

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Вятский государственный университет»

Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования «Уральский государственный лесотехнический университет»

На правах рукописи

Рублева Ольга Анатольевна

**ФОРМИРОВАНИЕ ШИПОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ
ДЕТАЛЕЙ ИЗ ДРЕВЕСИНЫ НА ОСНОВЕ
ТЕХНОЛОГИИ ТОРЦОВОГО ПРЕССОВАНИЯ**

05.21.05 – Дровесиноведение, технология и оборудование деревопереработки»

Диссертация на соискание ученой степени
доктора технических наук

Научный консультант:
доктор технических наук, профессор
Гороховский Александр Григорьевич

Киров – Екатеринбург 2020

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ.....	9
1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ.....	18
1.1 Анализ современного состояния технологий изготовления шиповых соединений.....	19
1.1.1 Характеристики соединений по длине.....	19
1.1.1.1 Виды и классификации соединений по длине.....	19
1.1.1.2 Элементы шипового соединения.....	24
1.1.2 Технологии изготовления шипов и проушин	25
1.2 Анализ современного состояния технологий прессования древесины.....	30
1.2.1 Способы прессования древесины.....	31
1.2.2 Процессы, сопровождающие пластическое деформирование древесины.....	35
1.2.2.1 Изменения структуры древесины при прессовании	35
1.2.2.2 Предпосылки применения способа холодного торцового прессования древесины.....	36
1.2.3 Параметры режимов прессования.....	38
1.2.3.1 Степень прессования древесины.....	38
1.2.3.2 Усилие прессования.....	41
1.3 Подходы к оценке качества клеевых шиповых соединений.....	43
1.3.1 Показатели качества клеевых соединений.....	43
1.3.2 Методы оценки и прогнозирования прочности клеевых соединений.....	44
1.3.3 Факторы, влияющие на качество шиповых соединений...	46
1.3.3.1 Угол перерезания волокон и длина клеевого шва	47
1.3.3.2 Величина затупления шипа и зазор в стыке.....	51
1.3.3.3 Точность изготовления, шероховатость поверхностей, тип посадки и толщина клеевого шва.....	52
1.3.4 Методы оценки эффективности технических решений....	53

1.4 Выводы. Задачи исследования.....	56
2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ ШИПОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ ТОРЦОВОГО ПРЕССОВАНИЯ.....	59
2.1 Исследование возможностей применения процесса местного торцового прессования для формообразования элементов шиповых соединений.....	59
2.1.1 Стадии процесса деформирования древесины при внедре- нии призматического индентора вдоль волокон.....	60
2.1.1.1 Деформирование и разрушение древесины при свободном сжатии вдоль волокон.....	60
2.1.1.2 Деформирование древесины при внедрении призм- матического индентора.....	66
2.1.2 Исследование качественных изменений структуры древе- сины при внедрении призматического пуансона.....	68
2.1.2.1 Обоснование изменений структуры древесины в деформированной зоне.....	68
2.1.2.2 Этапы формирования проушины в древе- сине сосны.....	71
2.1.2.3 Этапы формирования проушины в древесине бере- зы и дуба.....	73
2.1.2.4 Структура деформированной зоны.....	74
2.1.2.5 Точность формирования проушин.....	78
2.1.3 Определение граничных условий формирования каче- ственных проушин.....	79
2.1.3.1 Влияние влажности.....	79
2.1.3.2 Влияние наклона волокон.....	80
2.1.3.3 Влияние обжима заготовки.....	81
2.1.3.4 Влияние глубины внедрения пуансона.....	82
2.1.3.5 Условия формирования качественных проушин.....	83

2.2 Теоретическое обоснование закономерностей процесса формообразования элементов шиповых соединений способом торцового прессования	84
2.2.1 Обоснование выбора расчетной схемы.....	84
2.2.1.1 Модели древесины.....	84
2.2.1.2 Методы расчета и расчетные модели.....	85
2.2.1.3 Особенности теоретического решения задач при экспериментальном определении характеристик древесины.....	91
2.2.1.4 Обоснование расчетной схемы.....	92
2.2.2 Теоретическое обоснование механизма формирования прямоугольной проушины в процессе местного торцового прессования.....	93
2.2.3 Анализ процессов деформирования древесины при внедрении индентора вдоль волокон.....	99
2.3 Моделирование процесса внедрения индентора в древесину в программной системе прочностного конечно-элементного анализа..	102
2.3.1 Расчетная схема и постановка задач моделирования.....	102
2.3.2 Этапы прочностного конечно-элементного анализа.....	104
2.3.3 Анализ результатов моделирования.....	105
2.4 Обоснование требуемой точности формирования шипов способом торцового прессования.....	106
2.4 Анализ посадок в шиповых соединениях, выполненных в соответствии с существующими рекомендациями.....	107
2.4.1.1 Анализ рекомендаций по выбору точности и полей допусков в шиповых соединениях.....	107
2.4.1.2 Расчет посадок по вероятностному методу.....	110
2.4.1.3 Расчет посадок по методу максимума-минимума...	112
2.4.1.4 Расчет средних значений натяга или зазора.....	113
2.4.1.5 Выводы.....	114

2.4.2 Расчет посадок соединений на прямоугольные шипы с учетом особенностей назначения допусков многоэлементных соединений.....	115
2.4.2.1 Решение обратной задачи.....	116
2.4.2.2 Разработка требований к точности и конструктивным параметрам соединений и пуансонов.....	121
2.5 Выводы	122
3 ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ.....	124
3.1 Программа исследований.....	124
3.2 Характеристики и свойства исследуемых материалов.....	127
3.3 Характеристики применяемого оборудования, установок, приборов, средств измерений.....	129
3.3.1 Общая характеристика оборудования для проведения экспериментальных исследований.....	129
3.3.2 Экспериментальное оборудование для формирования проушин.....	131
3.4 Методика экспериментальных исследований.....	133
3.4.1 Определение усилия прессования прямоугольных проушин	133
3.4.2 Исследования анатомической структуры деформированных участков древесины	134
3.4.3 Определение относительной глубины уплотненной зоны....	136
3.4.4 Определение твердости дна проушины.....	137
3.4.5 Определение прочности шиповых соединений.....	139
3.4.6 Оценка точности и качества обработки поверхности прессованных проушин.....	143
3.4.7 Оценка качества макроструктуры пластически деформированной зоны.....	144
3.5 Методика планирования экспериментов и анализа экспериментальных данных.....	146
3.5.1 Методика планирования экспериментов.....	146

3.5.2 Методика статистической обработки и анализа экспериментальных данных.....	152
3.6 Методика определения рациональных значений параметров режимов торцового прессования.....	161
4 ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ПРЕССОВАНИЯ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ПРОУШИН.....	165
4.1 Исследование влияния параметров режима прессования одинарных проушин на энергосиловые характеристики процесса.....	165
4.1.1 Планирование и постановка экспериментов.....	165
4.1.2 Статистическая обработка результатов экспериментальных исследований по определению усилия прессования.....	171
4.1.3 Анализ результатов экспериментальных исследований усилия прессования.....	176
4.1.3.1 Анализ эмпирической модели для расчета усилия прессования прямоугольной проушины в древесине сосны	177
4.1.3.2 Анализ эмпирической модели для расчета усилия прессования прямоугольной проушины в древесине березы.....	179
4.1.3.3 Анализ эмпирической модели для расчета усилия прессования прямоугольной проушины в древесине дуба	181
4.1.4 Уточнение аналитической модели для расчета усилия прессования.....	184
4.2 Исследование влияния параметров режима прессования на показатели глубины деформированной зоны и твердости дна проушины	190
4.2.1 Результаты экспериментальных исследований по определению глубины деформированной зоны и твердости дна проушины	190
4.2.2 Анализ результатов экспериментальных исследований по определению глубины деформированной зоны и твердости дна проушины.....	193
4.3 Решение задачи оптимизации по определению рациональных значений параметров режимов прессования.....	199

4.4 Экспериментальная оценка влияния параметров режима прессования многократных шипов на энергосиловые показатели процесса...	207
4.4.1 Результаты исследований по оценке влияния параметров технологических режимов на усилие прессования многократных проушин.....	208
4.4.2 Корреляционный анализ.....	214
4.4.3 Линейный регрессионный анализ.....	214
4.4.3.1 Анализ остатков и оценка приемлемости модели...	214
4.4.3.2 Анализ регрессионного уравнения.....	217
4.4.3.3 Анализ коэффициента детерминации.....	218
4.4.3.4 Исключение факторов, не влияющих на отклик регрессионного анализа.....	218
4.4.4 Нелинейный регрессионный анализ.....	219
4.5 Выводы.....	221
5 ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ШИПОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ СПОСОБОМ ТОРЦОВОГО ПРЕССОВАНИЯ.....	224
5.1 Экспериментальная оценка прочности клеевых соединений по длине на прямоугольные прессованные шипы.....	225
5.1.1 Постановка экспериментов по оценке прочности соединений.....	225
5.1.2 Статистическая обработка и анализ результатов экспериментальных исследований прочности соединений	234
5.2 Результаты исследований точности формирования шипов и качества обработки поверхности проушин.....	243
5.3 Экспериментальная оценка качества макроструктуры пластически деформированной зоны.....	243
5.4 Исследование влияния геометрических характеристик шипов и расхода клея на прочность соединений.....	245

5.4.1	Постановка экспериментов по исследованию влияния геометрических характеристик шипов и расхода клея на прочность соединений.....	246
5.4.2	Статистическая обработка и анализ результатов исследований влияния геометрических характеристик шипов и расхода клея на прочность соединений.....	251
5.5.	Выводы.....	255
6	ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ФОРМИРОВАНИЯ ШИПОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ОСНОВЕ СПОСОБА ТОРЦОВОГО ПРЕССОВАНИЯ.....	257
6.1	Методика оценки эффективности шиповых соединений.....	257
6.1.1	Алгоритм оценки и выбора шиповых соединений различного назначения.....	257
6.1.2	Выбор параметров соединения.....	260
6.1.2.1	Разработка альтернативных вариантов соединений	260
6.1.2.2	Оценка альтернативных вариантов.....	265
6.1.3	Выбор наиболее эффективного оборудования и оснастки....	272
6.1.3.1	Подбор альтернативных вариантов оборудования...	272
6.1.3.2	Оценка эффективности альтернативных вариантов оборудования и оснастки.....	274
6.2	Этапы технологического процесса изготовления деталей шиповых соединений способом торцового прессования.....	277
6.3	Выводы.....	279
	ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ.....	280
	СПИСОК ИСПОЛЬЗУЕМОЙ ЛИТЕРАТУРЫ.....	282
	ПРИЛОЖЕНИЕ А. Номенклатура показателей качества шиповых соединений.....	326
	ПРИЛОЖЕНИЕ Б. Патенты на изобретения.....	333
	ПРИЛОЖЕНИЕ В. Акты и справки об апробации и внедрении.....	337

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы исследования.

Задачи повышения эффективности производства, в том числе качества и конкурентоспособности выпускаемой продукции, а также рационального использования природных ресурсов, включая комплексное использование древесного сырья, поставлены перед промышленностью России в ряде документов по основам государственной политики и стратегическому планированию Российской Федерации: Основах государственной политики в области использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов в Российской Федерации на период до 2030 года (утв. распоряжением Правительства РФ от 26 сентября 2013 г. № 1724-р), Стратегии развития лесного комплекса Российской Федерации до 2030 года (утв. распоряжением Правительства РФ от 20 сентября 2018 г. № 1989-р), Основах государственной политики в области экологического развития Российской Федерации на период до 2030 года (утв. Президентом РФ 30 апреля 2012 г.). Поставленные задачи интенсифицируют поиск новых технологических решений в деревообрабатывающей отрасли.

Одним из направлений экономии ресурсов и обеспечения высокого качества клееных, мебельных и столярно-строительных изделий является сращивание заготовок по длине. Конструкция и способ изготовления клеевого соединения оказывает влияние на технологичность и эксплуатационные характеристики изделий.

Формообразование профиля шипов является важным этапом технологического процесса изготовления соединений. Применяемые на практике способы формирования соединений на основе технологической операции фрезерования несовершенны в связи с их высокой энергозатратностью и трудоемкостью, наличием технологических ограничений по размерам обрабатываемых заготовок и геометрическим параметрам шипов, недостаточной точностью обработки, необходимостью удаления отходов при осуществлении операции, высокой стоимостью инструмента и сложностью его подготовки.

Таким образом, перспективным направлением совершенствования технологии сращивания по длине является разработка безотходных способов формирования элементов шиповых соединений высокого качества с использованием простого по конструкции и износостойкого инструмента. Разработка теоретических основ и методов повышения эффективности изготовления шиповых соединений высокого качества представляет собой актуальную научно-техническую проблему, имеющую важное хозяйственное значение для деревообрабатывающей промышленности.

Степень разработанности темы исследования.

Исследованиями процессов формирования и проблем качества клеевых соединений древесины занимались А.Н. Чубинский, Л.М. Ковальчук, А.С. Фрейдин, К.Т. Вуба, Ю.М. Иванов, С.Н. Пластинин, В.М. Попов, В.А. Куликов, Л.М. Сосна, Н.А. Гончаров, В.М. Хрулев, Г.С. Варанкина, А.А. Тамби, В.Н. Волынский, А.Г. Гороховский, M.D. Strickler, R.W. Jokerst, H.S. Ryu, A.N. Tankut, Y.Z. Erdil, A. Kasal, E. Naviarova, R.L. Aman, T. Biechele, S. Prekrat, J. Smardzewski, E. Likos, C.A. Eckelman, A. Frangi, I. Barboutis, V. Vasileiou, I. Džinčić, D. Živanić, M. Brabec, M. Derikvand, V.S. Kumar, C.M. Sharma, A.J. Lara-Vocanegra, W.G. Hu и др. Выполненные исследования позволили обосновать требования к качеству шиповых соединений древесины, выявить критерии их эффективности и основные направления совершенствования технологических процессов их изготовления.

Исследования процессов прессования и деформационных свойств древесины проводили П.Н. Хухрянский, Ф.П. Белянкин, Н.Ф. Лизунков, А.Ю. Рейхардт, П.Н. Житков, В.Е. Москалева, В.И. Бочкарев, К.И. Кириллов, В.Н. Бильтриков, Н.И. Винник, А.Г. Ракин, Б.И. Огарков, А.В. Апостол, Ю.Г. Лапшин, Т.П. Хухрянская, Б.Н. Уголев, Н.А. Модин, В.А. Шамаев, Л.Б. Лихачева, О.Р. Дорняк, F.P. Kollmann, Y. Ito, M. Tanahashi, E.V. Kultikova, N. Morsing, P. Navi, F. Girardet, J. Blomberg, B. Persson, J. Hesselbach, H.W. Hoffmeister, B. Mohebbu, H. Sharifnia-Dizboni, L.K. Bami, L. Rautkari, K. Laine, S.A. Ahmed, T. Morén, M. Gaff, J. Gáborík, A. Kutnar, M. Šernek,

A. Darwis, I. Wahyudi, W. Dwianto и др. Большинство работ посвящено исследованию процессов прессования древесины поперек волокон и определению свойств прессованной древесины. В то же время не решен ряд задач по исследованию возможностей и определению требований к параметрам режимов торцового прессования.

Проблемы оценки эффективности технических решений исследовали Ю.П. Анискин, Н.К. Моисеева, А.В. Проскуряков, Н.Н. Моисеев, И.В. Оптнер, И.В. Блауберг, А.И. Уемов, В.А. Блюмберг, Г.Г. Азгальдов, В.Ф. Глушко, Ф.И. Перегудов, А.В. Гличев, Ф.П. Тарасенко, А.И. Орлов, В.Ю. Дубов, В.Д. Ногин, А.Р. Бриль, В.Н. Андреев, А.Н. Катулев и др. Основные положения квалиметрии, теория и практика ее использования изложены в работах Г.Г. Азгальдова, Ю.П. Адлера, В.Г. Белика, Г.Н. Бобровникова, А.В. Гличева, В.В. Кочетова, Г.Н. Солода, А.В. Субето, А.Г. Сулова, М.В. Федорова, И.Ф. Шишкина, В.К. Федюкина и др. Выполненные исследования позволили сформулировать основные принципы и положения теории оценки эффективности технических решений, а также основные задачи, решение которых необходимо для разработки методики оценки эффективности технологий сращивания.

Цель работы – повышение эффективности процесса сращивания по длине деталей из древесины.

Объект исследования – клеевые шиповые соединения деталей из древесины.

Предмет исследования – процесс формирования шиповых соединений на основе способа торцового прессования.

Научной новизной обладают:

1. Теоретическое обоснование и экспериментальное подтверждение закономерностей механизма формообразования и параметров технологического процесса формирования проушин способом торцового прессования.

2. Математическое описание взаимосвязи параметров режима торцового прессования прямоугольных проушин с показателями их качества и энер-

госиловыми показателями процесса, позволяющее определить рациональные значения параметров технологических режимов.

3. Теоретическое и экспериментальное обоснование качества соединений заготовок из древесины при склеивании на прямоугольные прессованные шипы.

4. Методика оценки эффективности шиповых соединений и технологий их изготовления в соответствии с заданными потребительскими требованиями.

Теоретическая значимость работы.

Теоретическая значимость исследования заключается в развитии теорий пластического деформирования и прессования древесины применительно к описанию процесса местного торцового прессования, в раскрытии сущности процесса формирования рельефа при внедрении пуансона вдоль волокон.

Систематизация технологических факторов, влияющих на точность изготовления и эксплуатационные свойства шиповых соединений древесины, является основой для разработки мер по повышению эффективности производства клеевых шиповых соединений.

Практическая значимость.

Практическая значимость заключается в разработке:

- технологии сращивания древесины на прямоугольные прессованные шипы;

- конструкции штампового инструмента, позволяющего формировать элементы шиповых соединений в виде одинарных прямоугольных проушин или многократных шипов;

- методики обоснованного выбора геометрических параметров соединений и оценки их эффективности в зависимости от назначения и требований к конечным изделиям.

Разработанный способ торцового прессования элементов шиповых соединений позволяет повысить эффективность технологии изготовления ши-

повых соединений за счет обеспечения высокого качества изготовления шипов путем прессования, исключения энергозатрат на удаление отходов, снижения стоимости инструмента и затрат на его подготовку.

Методология и методы исследования.

Исследования проводились с использованием системного подхода, включающего методы теории прессования древесины, механики твердого деформируемого тела и анизотропных материалов; положения реологии, теории склеивания древесины, теории взаимозаменяемости; имитационное моделирование на основе метода конечных элементов; методы математического моделирования и многокритериальной параметрической оптимизации на основе численных методов решения многомерных задач с ограничениями; морфологический анализ, положения квалиметрии.

Экспериментальные исследования и обработку данных проводили с использованием методов планирования экспериментов и статистического анализа. Оснащение экспериментальных исследований соответствовало современным требованиям. Для исследования структуры пластически деформированной зоны использовали методы электронного сканирования и микросъемки. Методики определения характеристик свойств древесины и показателей качества шиповых соединений основывались на требованиях ГОСТ 15612-2013, ГОСТ 15613.5-79, ГОСТ 15613.4-78, ГОСТ 16483.23-73, ГОСТ 16483.3-84, ГОСТ 16483.10-73, ГОСТ 16483.17-81, ГОСТ 16588-91, ГОСТ 25346-2013, ГОСТ 33080-2014, ГОСТ 33081-2014, ГОСТ 33120-2014, ГОСТ 6449.1-82, ГОСТ 9013-59, ГОСТ 9330-2016.

Информационную базу исследований составили материалы научных исследований, научно-техническая, учебная и методическая литература, материалы периодических изданий, конференций, патентная информация.

Научные положения, выносимые на защиту.

1. Качество прессованных проушин определяется свойствами древесины заготовок и параметрами режимов торцового прессования, что достигается путем обеспечения регулируемого протекания процесса местного пласти-

ческого деформирования древесины при скалывании и смятии вдоль волокон.

2. Энергосиловые показатели процесса холодного торцового местного статического прессования и показатели качества полученных проушин зависят от влажности древесины заготовки и размерных характеристик проушин, которые могут быть оптимизированы.

3. При формировании элементов шиповых соединений способом торцового прессования обеспечивается технологическая стабильность процесса, что позволяет получить заданные прочностные характеристики без значимого увеличения энергозатрат на изготовление соединения.

4. Использование возможностей технологии торцового прессования для формирования точных шипов малых толщин позволяет повысить эффективность процесса сращивания, что подтверждается комплексной оценкой, учитывающей назначение соединений и требования к конечным изделиям.

Степень достоверности результатов.

Достоверность научных положений, выводов и рекомендаций обеспечивается применением обоснованных методов, методик и средств научного поиска; фундаментальных положений теории прессования древесины, механики твердого деформируемого тела, реологии, теории склеивания древесины, теории взаимозаменяемости, теории квалиметрии; использованием современных информационных технологий и целевого прикладного программного обеспечения; обоснованными упрощениями и корректными допущениями при разработке расчетных схем и моделей процессов; использованием стандартных методик испытаний и сертифицированного оборудования, применением вероятностно-статистических методов для обработки экспериментальных данных, проверкой воспроизводимости результатов исследования, подтвержденной адекватностью регрессионных моделей; согласованностью выводов с результатами известных работ; положительными результатами промышленной апробации.

Апробация результатов работы.

Основные положения и результаты диссертационной работы докладывались, обсуждались и были одобрены на международных и всероссийских научно-технических конференциях: Всероссийской ежегодной научно-технической конференции «Наука – производство – технологии - экология» (г. Киров, 2000-2006 , 2008 гг.); Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы развития лесного комплекса» (г. Вологда, 2005, 2008, 2010-2011, 2019 гг.); Всероссийской ежегодной научно-технической конференции "Общество, наука, инновации" (г. Киров, 2010-2020 гг.); Международном евразийском симпозиуме «Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века» (г. Екатеринбург, 2010, 2012, 2017-2020 гг.); научно-практической конференции профессорско-преподавательского состава Сыктывкарского лесного института (г. Сыктывкар, 2011-2012 гг.); Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы лесного комплекса» (г. Брянск, 2011-2012, 2015 гг.); Международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы и перспективы развития лесопромышленного комплекса» (г. Кострома, 2012 г.); Международной научно-технической конференции «Техника и технологии – мост в будущее» (г. Воронеж, 2014 г.); Международной научно-технической конференции «Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика» (г. Воронеж, 2015 г.); международной научно-технической конференции «Леса России в XXI веке» (г. Санкт-Петербург, 2015 г.); Международной научно-практической конференции «Экологические и биологические основы повышения продуктивности и устойчивости природных и искусственно возобновленных лесных экосистем» (г. Воронеж, 2018 г.); Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов «Научное творчество молодежи – лесному комплексу России» (г. Екатеринбург, 2019, 2020 гг.); IX Всероссийской научно-практической конференции с международным участием «Современная техника и технологии: проблемы, состояние и перспективы» (г. Рубцовск, 2019

г.); II Международной научно-практической конференции «Сохранение лесных экосистем: проблемы и пути их решения» (г. Киров, 2019 г.); XII Международной научно-технической конференции «Лесная наука в реализации концепции уральской инженерной школы: социально-экономические и экологические проблемы лесного сектора экономики» (г. Екатеринбург, 2019 г.).

Разработанные шиповые соединения демонстрировались на межрегиональных специализированных выставках «Лес. Деревообработка. Мебель» (г. Киров, 2005-2007 гг.) и «ВяткаДревМаш» (г. Киров, 2008-2010 гг.), выставке «Вятский левша» (г. Киров, 2006 г.); выставке «Интеллект Вятки» (г. Киров, 2000 г.); международной научно-технической выставке «Российская национальная выставка» (г. Минск, 2005 г.); выставках «Живые системы» (г. Киров, 2006–2007 гг.).

Результаты проведенных исследований апробированы в производственных условиях на ООО «Техноресурс» (г. Киров), ООО «Эдан-мебель» (г. Киров), ООО ПКП «Алмис» (г. Слободской) (Приложение В).

Результаты исследований использованы в учебном процессе в дисциплинах «Теоретические основы склеивания древесных материалов», «Технология изделий из древесины», «Основы конструирования изделий из древесины», «Технологии специальной обработки древесины», «Методология проектирования технологических процессов в деревообработке», «Прогрессивные технологии деревообработки» (Приложение В).

Личное участие автора.

Личное участие автора состоит в выборе направления исследований, темы диссертации, разработке ее идей, постановке и решении задач, разработке основных теоретических положений и математических моделей. Планирование и проведение представленных в работе исследований осуществлено лично автором; при непосредственном участии автора разработаны и изготовлены опытные образцы инструмента и экспериментальная оснастка; автором лично обработаны и интерпретированы экспериментальные данные.

Автору принадлежат основные идеи и заключения в опубликованных лично и в соавторстве научных статьях.

Публикации.

По результатам выполненных исследований опубликована 81 работа, в том числе 11 статей в ведущих рецензируемых изданиях из перечня ВАК Минобрнауки РФ (1 из них индексируется в базе данных WoS CC), 2 статьи в изданиях, индексируемых в базах данных WoS CC и Scopus, 60 публикаций в сборниках материалов международных, всероссийских и региональных конференций; получено 4 патента РФ на изобретения (приложение Б).

Объем и структура диссертации.

Диссертация состоит из введения, шести разделов, заключения, списка литературы из 392 наименований, включающего 86 источников на иностранном языке, и приложений. Работа имеет общий объем 346 страниц, в том числе 281 страница основного текста, содержит 122 рисунка, 41 таблицу, 148 формул, 21 страницу приложений.

1 СОСТОЯНИЕ ВОПРОСА И ЗАДАЧИ ИССЛЕДОВАНИЯ

Комплексное использование сырья является одним из приоритетных направлений рационального использования природных ресурсов, входящего в число основных задач экологического развития России [164]. Вместе с тем Стратегия развития лесного комплекса РФ и государственная политика в области использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов предполагают рост качества и конкурентоспособности выпускаемой продукции [191, 192] при одновременном развитии производств по переработке низкокачественной древесины. Эти задачи, поставленные перед деревообрабатывающей отраслью, интенсифицируют поиск решений по повышению эффективности производств клееных изделий из древесины, мебельных и столярно-строительных производств.

Существенное расширение сферы применения сырья низкого качества в этих производствах достигается за счет введения технологического этапа сращивания заготовок по длине [32, 116, 132, 181, 183, 83, 204, 208, 307, 312, 341, 387]. При раскросе такого сырья с удалением пороков древесины и дефектов обработки получают маломерные заготовки, на торцах которых далее формируются шипы, как правило, зубчатой формы, затем наносится клей и производится сборка и запрессовка соединения. Этап сращивания – трудоемкий и энергозатратный процесс, несовершенный с точки зрения наличия технологических ограничений по геометрическим параметрам шипов, необходимости удаления стружки, высокой стоимости фрезерного инструмента [181, 341, 307, 312]. Устранение указанных недостатков является перспективным направлением совершенствования технологии сращивания.

Цель раздела – провести анализ состояния исследуемого вопроса, сформулировать задачи исследования.

В разделе представлены результаты:

- аналитического обзора современного состояния технологий изготовления шиповых соединений;

- анализа современного состояния технологии прессования древесины;
- анализа современных подходов к оценке качества шиповых соединений;
- анализа методов оценки эффективности технических решений.

Результаты анализа опубликованы автором в работах [81-83, 102, 117, 119, 123, 125, 170, 172, 173, 188, 202, 208, 221-223, 222, 228, 230].

1.1 Анализ современного состояния технологий изготовления шиповых соединений

1.1.1 Характеристики соединений по длине

1.1.1.1 Виды и классификации соединений по длине.

Конструкция и способ соединения деталей в изделии из древесины оказывает решающее влияние на прочность готового изделия, его внешний вид, надежность в процессе эксплуатации, а также технологичность изготовления изделия. Клеевые соединения относятся к наиболее технологичным и обеспечивают высокую прочность и формоустойчивость изделий, снижают риск растрескивания и коробления древесины [32, 107, 166, 181, 183, 298, 307, 308, 312, 315, 341, 359, 365].

Параметры наиболее распространенных видов соединений регламентированы ГОСТ 9330-2016, 19414-90 [53, 72]. Соединения на клею подразделяют на следующие группы: угловые (концевые, серединные и ящичные), боковые (пластевые и кромочные), по длине (торцовые). Классификация соединений может быть также проведена по ряду признаков: видам конструктивных решений, видам соединяемых элементов [60], расположению шипов [53], их форме, количеству, конструктивным признакам [73]. Различные варианты классификаций соединений приведены также в научно-технической литературе [9, 22, 35, 156, 262].

Существующие классификаторы учитывают особенности конструкции применяемых в настоящее время шиповых соединений, изготовленных

наиболее распространенными способами: фрезерованием, долблением, сверлением и др. В работе [262] приведена «классификационная схема деревянных соединений и сопряжений», применяемых для изготовления строительных деталей. В работе [156] приведена классификация, учитывающая форму стыка: впритык, на ус или на шипы (рисунок 1.1). Здесь, помимо зубчатых, учтены и другие формы шипов.



Рисунок 1.1 – Классификация соединений по длине по В.А. Прохорову [156]

В работе [9] соединения по длине подразделены на следующие виды: на ус (рисунок 1.2 б), шипом в торцовый паз (рисунок 1.2 з), вполдерева прямым стыком, на зубчатый шип (рисунок 1.2 в).

Из рассмотренных типов соединений наиболее часто применяются конструкции, показанные на рисунке 1.2, а-в.

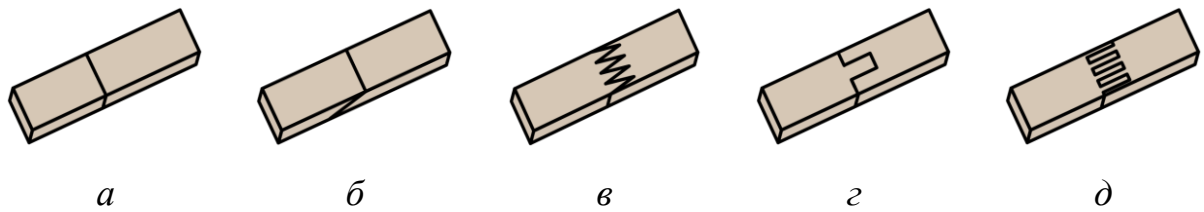


Рисунок 1.2 – Виды соединений по длине: *a* – впритык; *б* – на ус; *в* – на зубчатые шипы; *г* – шипом в торцовый паз; *д* – на прямоугольные шипы

Соединения впритык (рисунок 1.2 *a*) просты в изготовлении, их внешний вид считается эстетичным, прочность достаточна для дальнейшей технологической обработки; они могут быть использованы в относительно слабо сжатых зонах конструкций, поскольку не воспринимают растягивающих напряжений и их торцы деформируются при сжатии [246].

Соединения на ус (рисунок 1.2 *б*) обеспечивают высокую прочность склеивания, но связаны со значительными потерями древесины по причине требований к длине уса до 10–15 толщин заготовки [32]. Поэтому их использование рационально лишь при сращивании длинномерных заготовок (2–3 м и более). Процесс изготовления данного типа соединений усложнен введением дополнительной технологической операции обжатия соединения в течение периода отверждения клеевого шва, необходимого для предотвращения скольжения заготовок по скошенным плоскостям в процессе запрессовки, а также введением технологической операции снятия образовавшегося провеса при последующей обработке склеенных заготовок.

Соединения на зубчатые шипы является наиболее распространенным типом (рисунок 1.2 *в*). Это сравнительно экономичное соединение ввиду малых потерь древесины из-за небольшой длины шипов – до 50 мм; при этом возможно использование сравнительно коротких заготовок длиной от 150 мм. Соединение обладает свойством самоторможения – способностью сохранять полученный натяг после снятия давления; имеет достаточно высокую прочность. Параметры соединения на зубчатый шип регламентированы ГОСТ 19414-90 [53].

Разновидностью зубчатых шипов являются мини-шипы, отличающиеся меньшими размерами: например, длина шипа 7,5 мм, шаг 2,5 мм, затупление 0,2 мм. Использование шипов малых размеров уменьшает потери пиломатериалов при сращивании в среднем на 24,5 мм на одно соединение, упрощает нарезку шипов и запрессовку соединений, снижает расходы на изготовление [183].

Недостатком зубчатой формы шипов является зависимость прочности соединения от затупления шипов. Для повышения прочности соединения необходимо обеспечить изготовление шипов с малым углом наклона и острыми концами шипов, что трудно достижимо в производственных условиях [32, 96, 183, 307, 312, 332, 341, 359]: тонкие концы резцов быстро нагреваются и становятся непригодными к работе. Это вызывает необходимость частой переточки и без того дорогостоящего инструмента. К недостаткам соединения на зубчатый шип также относится повышенный расход клея вследствие впитывания его перерезанными волокнами древесины. Технология фрезерования, применяемая для изготовления зубчатого шипа, связана с образованием значительного количества отходов в виде стружки, что требует установки систем аспирации (см. п. 1.1.2).

Варианты альтернативных решений конструкции зубчатых соединений [166, 167, 169], основанные на варьировании высоты и шага шипов, количестве их рядов, не решают указанных проблем и, напротив, на порядок усложняют требования к конструкции инструмента.

Для целей сращивания по длине, кроме соединений на относительно острые зубчатые шипы, могут применяться также соединения на переходные варианты зубчатых шипов с затуплением (трапециевидной формы), на шипы конструкции «ласточкин хвост» [247] и на прямоугольные шипы [8, 9, 335, 392]. При этом прямоугольные шипы могут быть однократными (соединение шипом в торцовый паз (рисунок 1.2 з), иначе называемое «в торцовый гребень» [9], «в паз и гребень», «в торцевой замок с гребнем» [262], «соединение

с коренным шипом» [60]), либо многократными (рисунок 1.2 д) [8, 331, 336, 392].

Соединение шипом в торцовый паз (рисунок 1.2 з) менее распространено, чем соединение на зубчатые шипы, и применяется в основном для соединений деталей, находящихся в сжатой зоне конструкции. Недостатком соединения является недостаточно высокая прочность из-за малой площади склеивания. Преимуществом данного типа соединения является более простая, чем для изготовления зубчатого шипа, конструкция фрезерного инструмента, требующая не такой частой переточки.

Соединение по длине на многократные прямоугольные шипы (рисунок 1.2 д), по мнению ряда исследователей, способно составить конкурентоспособную альтернативу зубчатому шиповому соединению [8, 9, 170, 173, 227, 331, 336, 392]. До настоящего времени такая форма шипов применялась в основном для производства угловых концевых и ящичных соединений [73], включая соединения с открытыми или закрытыми (с потемком) шипами, одинарными или множественными, сквозными или несквозными. Вместе с тем некоторые зарубежные исследователи приводят соединение на многократные шипы прямоугольной формы не только в качестве одного из вариантов соединений по длине наряду с шипами треугольного или трапециевидного сечения, но и относят их к одной группе под общим названием «finger joints» [331].

Фактически соединение на прямоугольные шипы представляет собой комбинацию потенциально высокопрочных клеевых соединений на гладкую фугу [96, 349] и торцовых соединений впритык. Преимуществом соединения на прямоугольные шипы по сравнению с соединением в торцовый паз является большая площадь склеивания; по сравнению с зубчатым шиповым соединением – более простая конструкция инструмента для изготовления шипов. Такой способ не менее перспективен, чем сращивание на зубчатые шипы, в особенности, если будут решены указанные ранее проблемы (связанные

с геометрическими характеристиками шипов, инструментом, отходами), в том числе, за счет поиска новых технологий изготовления шипов.

В настоящее время в научно-технической литературе и нормативной документации отсутствуют исследования, связанные с решением указанных вопросов. Это приводит к постановке задачи исследования, связанной с поиском и обоснованием новых технологических решений, обеспечивающих решение поставленных проблем.

1.1.1.2 Элементы шипового соединения.

Шиповые соединения на прямоугольные шипы различаются по признакам входящих в состав соединения элементов: шипа (гребня) и паза (проушины, гнезда) (рисунок 1.3).

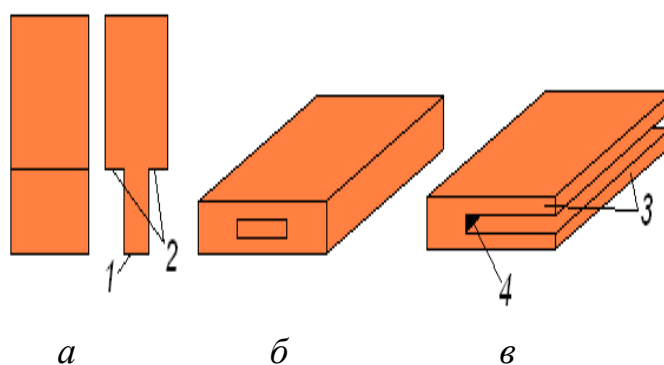


Рисунок 1.3 – Элементы шипового соединения: *a* – шип; *б* – гнездо; *в* – проушина; 1 – вершина шипа, 2 – заплечики; 3 – боковые грани проушины; 4 – дно проушины

Вариант классификации шиповых соединений по указанным признакам может быть разработан на основе ГОСТ 9330 [73]:

- по конструкции шипа (цельный или вставной);
- по количеству шипов (одинарный или двойной);
- по направлению оси шипа (прямой или косой);
- форме шипа (плоский, ласточки хвост или круглый);

- по выходу на кромку (открытый или закрытый) – для концевых угловых соединений;

- по выходу на пласт (сквозной или несквозной) – для срединных соединений.

Данная классификация, так же, как и приведенная на рисунке 1.1, учитывает особенности конструкции шиповых соединений, изготовленных наиболее распространенными способами: фрезерованием, долблением, сверлением и не учитывает возможности других технологий изготовления шипов и проушин. В литературе не обнаружено методик, классификаторов и других рекомендаций, позволяющих обоснованно выбрать параметры соединений, изготовленных с использованием технологий прессования.

1.1.2 Технологии изготовления шипов и проушин

Существует ряд способов формообразования элементов шиповых соединений в виде шипов и проушин, которые можно подразделить на группы процессов обработки резанием, обработки давлением и комбинированные способы (рисунок 1.4).

Наиболее распространенным способом формообразования профиля шипов является цилиндрическое фрезерование [9, 22, 32, 115, 116, 236]. Недостатками данной технологии являются высокая стоимость фрезерного инструмента, затраты на его периодическую заточку; увеличенная энергоемкость процесса фрезерования, связанная с необходимостью удаления стружки; конструктивные ограничения по геометрическим параметрам шипов [113, 183, 222, 236, 246] и обусловленное этим снижение прочности. Острые зубчатые шипы с минимальным затуплением, имеющие наиболее высокую прочность до 75 – 83 % [32, 387], затруднительно получить в производственных условиях по причине перегрева острых кромок инструмента. Это не позволяет выполнить рекомендации по длине клевого шва, равной 10 – 15 тол-

щинам заготовки [32], и соответствующей уклону (углу перерезания волокон), равному $1/10 - 1/15$ (от $5,7^\circ$ до $3,8^\circ$).



Рисунок 1.4 – Способы формообразования элементов шиповых соединений

Часто угол перерезания волокон значительно больше: например, шипы с параметрами $10 \times 3,8 \times 0,8$ мм (длина \times шаг шипа \times затупление) имеют угол перерезания волокон более $8,5^\circ$, а шипы с параметрами $12 \times 6,2 \times 0,8$ мм еще больший угол $12,7^\circ$ [283]. В местах затуплений угол перерезания волокон составляет 90° . Открытые поры интенсивно впитывают клей, что приводит к концентрации напряжений в клеевом шве и снижает прочность соединения [284].

Особенностью процесса фрезерования является вероятность образования сколов и трещин на обрабатываемой поверхности. При фрезеровании древесины в торец начальный угол встречи при входе резца в материал составляет 90° . Волокна древесины сначала перерезаются, а затем стружка скалывается передней поверхностью лезвия в плоскости волокон. Характерный дефект обработки – концевой скол, который образуется при недостаточном подпоре со стороны оставшейся древесины и обусловлен слабой сопротивляемостью древесины растяжению поперек волокон. Позднюю древесину при перерезании волокон можно рассматривать как пластинку, опирающуюся на более слабый и легко деформируемый слой ранней древесины. При отгибе слоя поздней древесины нарушается связь с ранней древесиной путем разрыва стенок клеток с образованием трещины [101, 139], снижающей в дальнейшем прочность шипового соединения.

Фрезерование шипов прямоугольной формы также имеет ряд особенностей. При изготовлении прямоугольных шипов, предназначенных для сращивания по длине, критичным показателем является точность их формирования. Малейшие отклонения размеров шипов в несколько десятых долей миллиметра, вызванные неточностью сборки или заточки, могут существенно снизить плотность посадки и прочностные показатели соединений [328, 329, 335, 366, 382, 383].

С помощью сверления или фрезерования концевой фрезой получают гнезда с закругленными концами в плане и прямыми углами в разрезе (рисунок 1.5 а-д [22, 35]). При сборке такого соединения образуются зазоры по боковым граням прямоугольного шипа. Для их устранения необходимо производить обжим шипа в вайме (прессе) для получения заovalенной формы сечения, либо изготавливать шип путем фрезерования по контуру, что усложняет технологический процесс.

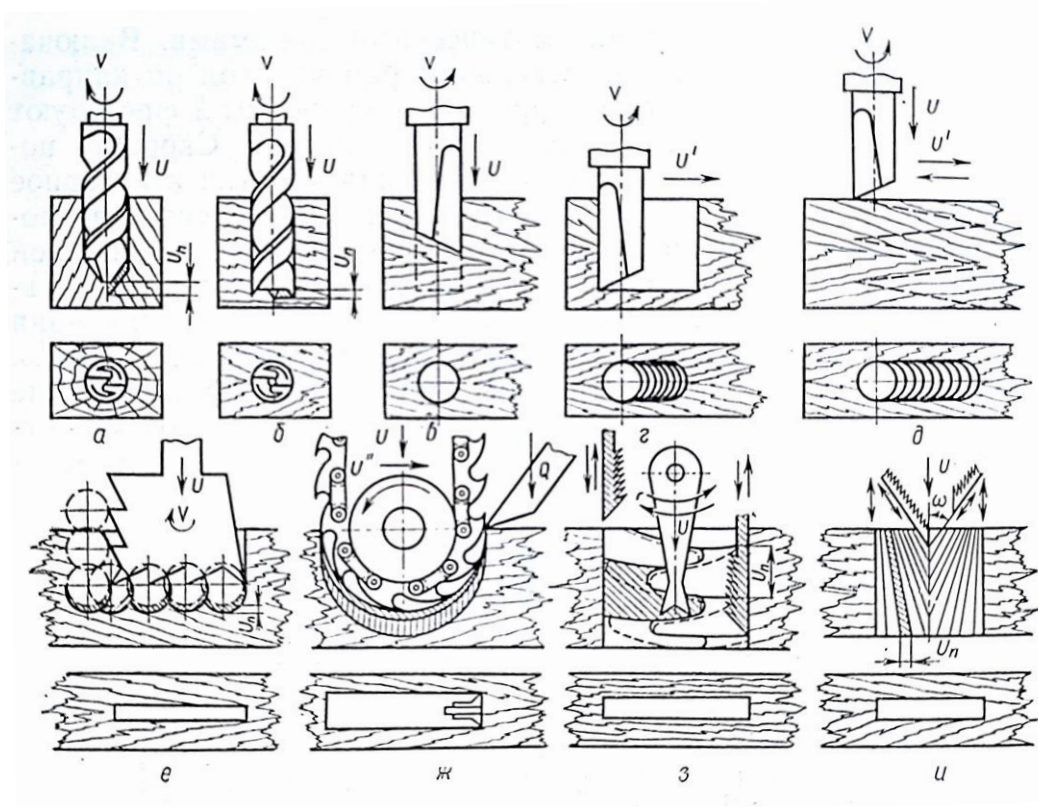


Рисунок 1.5 – Схемы формирования гнезд и отверстий [35]:
a, б – спиральным сверлом; *в-д* – концевой фрезой; *е* – долбяком;
ж – фрезерной цепью; *з, и* – специальным инструментом

Разновидностью рассмотренных выше способов является изготовление шипов с помощью «устройства для формирования соединений деревянных деталей», конструкция которого приведена в авторском свидетельстве [167]. Устройство включает суппорт с несколькими рядами инструментов типа концевых фрез, закрепленными с помощью хвостовиков. При подаче суппорта вдоль волокон, в торец детали, инструменты формируют конические шипы путем удаления стружки. Данное устройство, в отличие от распространенных фрезерных станков, позволяет получить несколько рядов шипов на торце детали. Недостатками устройства являются повышенная сложность конструкции, обслуживания, настройки и регулировки, значительные расходы на заточку инструмента, необходимость удаления стружки из зоны резания.

Способы формирования шипов пилением и протяжкой применяются реже, поскольку малопроизводительны, менее изучены и рекомендуются в основном для разового изготовления шиповых соединений с помощью ручного инструмента [8, 247, 336].

Частично устранить указанные выше недостатки способов обработки резанием позволяет применение комбинированного способа формирования зубчатых шипов с использованием процесса холодного или горячего штампования по местам предварительных пропилов [1, 174, 341]. Так, в способе изготовления рамок из деревянных брусков [1] применяется формирование зубчатых шипов нагретым до 250 – 300°C штампом по предварительным пропилам. При использовании данного способа снижаются затраты на заточку режущего инструмента и на транспортировку отходов. Вместе с тем, имеются следующие недостатки: затраты энергии на нагрев инструмента, потемнение поверхности шипов, усложнение технологического процесса за счет введения дополнительной операции предварительного пропиливания, а также ограничения по форме и размерам шипов, зависящие от деформативных свойств древесины поперек волокон [341]. Для большинства деловых пород максимальное значение деформации при сжатии поперек волокон не превысит 70 % [174, 293, 294]; это не дает возможности сформировать относительно острые и длинные шипы [174]. В связи с этим способ штампования зубчатых шипов по местам предварительных пропилов ориентирован в основном на изготовление соединений неконструкционного назначения.

Возможно также получение микрошипов методом «прессования горячими матрицами» [181]. К недостаткам данного способа относятся расход электроэнергии на нагрев штампа; потемнение древесины в зоне нагрева; повышенный расход клея в шиповом соединении вследствие высокой шероховатости поверхности шипов из-за вскипания лигнина. Описанные способы на основе горячего прессования недостаточно изучены и не нашли широкого применения в промышленности.

Из ранее опубликованных работ [114] известно, что рельефы на торцах заготовок в форме проушин разнообразных форм сечения могут быть получены способом холодного торцового местного прессования, путем вдавливания пуансона вдоль волокон древесины. Рельефы, полученные этим способом, по форме соответствуют профилю пуансона и имеют прямолинейные контуры дна проушины, без закруглений по дну и боковым граням, что предотвращает появление нежелательных зазоров в сопряжении шип-проушина. Этот способ не требует предварительного пропиливания пазов; не требуется нагрева инструмента; цвет древесины не изменяется. Инструмент (пуансон) по конструкции проще, чем фреза; его кромки при работе не нагреваются, мало изнашиваются и не требуют частой переточки. Однако способ до настоящего момента был недостаточно изучен, отсутствует опубликованная информация о его применении для изготовления проушин и шипов.

Таким образом, холодное торцовое местное прессование является перспективным способом формирования элементов шиповых соединений, но требует дальнейшего изучения.

1.2 Анализ современного состояния технологий прессования древесины

Способность древесины изменять форму, а также эстетические, физико-механические и эксплуатационные свойства под воздействием специальных способов обработки повышает ее ценность и диапазон применения как конструкционного материала [20, 81, 83, 95, 103, 112, 137, 158, 163, 186, 196, 263, 289, 292, 311, 343, 357, 360, 364, 367]. Существуют различные способы модифицирования древесины, включающие механическое, термическое, химическое, радиационное воздействие, а также их сочетания [158, 159, 172, 186, 258-261, 294, 299, 310, 319, 320, 333, 350, 351, 380]. Для каждого из этих способов находится своя сфера применения, несмотря на некоторые особенности, например, снижение механических свойств древесины при термической обработке [384].

Прессование является разновидностью модифицирования древесины (механическое модифицирование). Его особенностью является возможность придания древесине не только высоких механических свойств за счет ее уплотнения [348, 351, 353, 357], но также придания ей требуемой формы [171, 321, 350].

Исследования в области прессования древесины и ее деформационных свойств проводили П.Н. Хухрянский, Ф.П. Белянкин, Н.Ф. Лизунков, А.Ю. Рейхардт, А.А. Солнцев, С.П. Красовский, Я.С. Галлай, А.Е. Омелянов, Л.М. Перелыгин, С.А. Лавочкин, П.Н. Житков, В.Е. Москалева, В.И. Бочкарев, К.И. Кириллов, В.Н. Бильтриков, Н.И. Винник, А.Г. Ракин, Б.И. Огарков, А.В. Апостол, Ю.Г. Лапшин, Т.П. Хухрянская, Б.Н. Уголев, Н.А. Модин, В.А. Шамаев, О.З. Хуажев, Л.Б. Лихачева, О.Р. Дорняк, F.P. Kollmann, Y. Ito, M. Tanahashi, E.V. Kultikova, N. Morsing, P. Navi, F. Girardet, J. Blomberg, B. Persson, J. Hesselbach, H.W. Hoffmeister, B. Mohebbi, H. Sharifnia-Dizboni, L.K. Vami, L. Rautkari, K. Laine, S.A. Ahmed, T. Morén, M. Gaff, J. Gáborik, A. Kutnar, M. Šernek, A. Darwis, I. Wahyudi, W. Dwianto и др. [4, 11, 12, 16, 20, 26, 86-90, 95, 103, 104, 108, 109, 112, 131, 137, 153, 158, 177, 178, 186, 196, 273-275, 288-295, 299, 309, 311, 318, 321-323, 338, 343, 348, 350, 351, 360, 362, 364, 380]. Большинство исследований посвящено процессам поперечного прессования древесины. Для них разработаны технологические рекомендации, изучены и нормированы свойства прессованной древесины [74, 80, 95, 103, 147, 158, 168, 186, 263, 293, 299, 313, 318, 343, 363, 373, 381].

1.2.1 Способы прессования древесины

Способы прессования древесины подразделяют по ряду признаков.

По наличию влаготеплообработки различают прессование с предварительной влаготеплообработкой (пропариванием, пропиткой аммиаком, ацетилирование, с предварительной термообработкой и пропиткой в минеральных маслах, предварительным прогревом в печах и др.) [35, 95, 103, 158, 186,

290, 292-294, 322, 362, 388]; с последующей влаготеплообработкой [57, 172, 258-261]; без применения влаготеплообработки [4, 114, 323, 367].

По направлению усилия относительно граней заготовки различают прессование одностороннее (одноосное); двустороннее (двухосное); с прокаткой; пульсирующим давлением; контурное – по внешнему или внутреннему контуру; всестороннее (гидростатическое) [80, 158, 186, 290, 292-294].

По направлению усилия относительно волокон древесины различают поперечное (наиболее распространенный способ) и торцовое (вдоль волокон), например, при производстве торцового паркета [104, 137, 292-294].

По равномерности воздействия на заготовку различают прессование равномерное и неравномерное (в частности, местное) [4, 323].

В промышленности наиболее широко применяются способы прессования древесины с предварительным прогревом и увлажнением (провариванием или пропариванием) с целью снижения усилия прессования [147]. С увеличением влажности и температуры древесины ее деформативность повышается, а прочность снижается. По данным работы [35], древесина становится более пластичной при влажности около 30 % и температуре 160°С. Для стабилизации формы в техпроцесс вводятся дополнительные операции охлаждения и последующей сушки до влажности 12 % и менее.

В американской промышленности в 1979 г. начали изготавливать прессованную древесину «стейпак» без предварительного пропаривания [246]. Полученный материал не теряет свою форму при разбухании. Режимы прессования подбирают так, чтобы лигнин становился текучим. Назначение способа – уплотнение углов ножек письменных столов (места, подверженные износу и откалыванию) и кеглей, поскольку ударные нагрузки сокращают срок их службы.

Недостатком способов прессования с предварительным прогревом и увлажнением является потемнение древесины как результат воздействия повышенной температуры. Это ограничивает возможность применения данных способов для изготовления деталей мебели и других изделий. Потемнения

можно избежать, применяя способы холодного прессования [4, 80, 147, 158, 172, 323, 367].

Способы холодного и (или) сухого прессования без предварительного прогрева и (или) увлажнения заготовок менее изучены и распространены [323, 367]. Имеются результаты исследований, показывающих, что обработка холодной сухой древесины дает положительные результаты [172, 173, 202, 203, 258-261, 323, 367].

К таким способам относятся, в частности, ускоренный беспропарочный способ прессования (1968 г.) [80] и способ поперечного прессования заготовок в холодном состоянии, с влажностью древесины от 14 до 19 % (1975 г.) [147, 158, 80]. Прессование осуществляется в пресс-формах с удельным давлением 20–50 МПа, с последующей сушкой до влажности 6–8% при температуре 120–140°C из расчета 4–8 мин на 1 мм толщины заготовки. Полученные заготовки имеют светлый тон без признаков гидролиза, что обеспечивает сохранение пластичности и пористой структуры древесины.

Известен также способ производства цельнопрессованной древесины, включающий уплотнение брусков в холодном состоянии, прогрев, прессование, термическую обработку спрессованных брусков и их охлаждение [263].

Способ получения прессованных изделий из древесины [168] включает холодное прессование пакета намазанных клеем заготовок влажностью 15% до заданной плотности с усилием 50–70 МПа, выдержку под этой нагрузкой в течение 1–2 мин, фиксацию спрессованного пакета и сушку в камере.

Рассмотренные способы относятся к поперечному прессованию древесины. Способ торцового прессования древесины менее изучен. В 1932 г. инженер А.В. Малышев предложил применять торцовое прессование для изготовления мелких галантерейных изделий, например, пуговиц. Он считал, что структура древесины в результате деформирования вдоль волокон приобретает новые положительные свойства: высокую прочность и износостойкость [95]. Торцовое прессование нашло применение при изготовлении торцовой шашки для покрытия полов и мостовых и торцового щитового паркета. В ра-

боте [137] разработаны рекомендации по выбору режимов торцового прессования при изготовлении этих изделий.

Недостаточно изучены процессы неравномерного прессования с целью получения рельефных отпечатков в виде пазов или отверстий. В основном они предполагают прессование поперек волокон [4, 323, 338].

Местное торцовое прессование позволяет получать четкие рельефы на торцовых поверхностях заготовок, с повышенной плотностью и твердостью поверхности [114, 120, 122, 124, 278] и является перспективным способом изготовления прямоугольных проушин в торцах заготовок. Однако анализ научно-технической литературы показал, что до исследований, проводимых автором, не было опубликованных работ, содержащих рекомендации по выбору режимов местного торцового прессования вдоль волокон.

1.2.2 Процессы, сопровождающие пластическое деформирование древесины

1.2.2.1 Изменения структуры древесины при прессовании.

В большинстве литературных источников приводятся сведения о структуре древесины, прессованной поперек волокон. Исследованиями свойств прессованной древесины, в частности, ее деформативности, прочности и сопротивления нагрузкам, занимались В.Н. Бильтриков, В.В. Бочкарев, П.Н. Житков, К.И. Кириллов, Ю.Г. Лапшин, Т.П. Хухрянская, А.Е. Золотарев и др. [12, 20, 95, 112, 131, 290]. Некоторые сведения об изменениях структуры древесины в процессе сжатия вдоль волокон приведены в работе [275]; сведения об изменениях структуры древесины некоторых лиственных пород при прессовании вдоль волокон приведены в работе [137]. В работе [114] приведены некоторые сведения о режимах местного холодного торцового прессования в обойме.

В 1874 г. ботаник Шведенер выдвинул идею строительного-механического принципа в анатомическом строении растений [196]. В 1936 г.

В.Ф. Раздорский предположил, что различие в физических свойствах целлюлозы и лигнина дает возможность сравнить целлюлозный скелет, пропитанный лигнином в оболочках клетки, с железным остовом в арматуре бетонной стойки. В литературе также встречается сравнение целлюлозного скелета с каркасом из пружинной стали, поскольку он обладает высокой эластичностью и имеет определенную устойчивую ориентацию [196].

При свободном сжатии древесины вдоль волокон происходит сдвиг в радиальной и тангенциальной плоскостях [275]. В древесине с четко выраженными ранней и поздней зонами сдвиг вызывает образование складок поздней древесины, видимых на тангенциальной поверхности. При этом ранняя древесина уплотняется в большей, а поздняя – в меньшей степени [114, 117, 119, 120, 124, 206]. Деформация протекает за счет смятия целлюлозного скелета и перемещения или сдвигов наполнителя этого скелета. Уплотнение происходит за счет полостей клеток, сосудов, межклеточных пространств и пор, а также за счет выдавливания связанной влаги [196, 292, 294]. Повышенная влажность заготовки при интенсивном процессе уплотнения приводит к разрушению структуры древесины, так как принудительное перемещение значительного количества влаги по капиллярам древесины вызывает появление в ней микротрещин [147]. Предположительно, при внедрении индентора вдоль волокон в древесине будут происходить аналогичные процессы, с учетом особенностей стесненного состояния деформации в тангенциальном направлении за счет поддержки соседних участков древесины [12, 20, 24, 95, 112, 131, 143, 238-240, 313, 314, 318, 342, 361, 370, 376].

Целлюлозный скелет древесины после разгрузки стремится восстановить свою форму. Степень восстановления формы древесины зависит от коэффициента внутреннего трения: чем он меньше, тем ближе восстановленная форма древесины к первоначальной. Коэффициент внутреннего трения зависит от температуры, породы и влажности древесины [158]. У влажной древесины благодаря незначительному коэффициенту внутреннего трения большая часть потенциальной энергии, накопленной в целлюложном скелете за

счет сил упругости, переходит в работу на восстановление формы. У сухой древесины наполнитель целлюлозного скелета находится в затвердевшем состоянии, коэффициент внутреннего трения достигает значительной величины. Увлажнение древесины освобождает потенциальную энергию, оболочки деформированных клеток частично или полностью восстанавливают форму. (Поэтому традиционные способы прессования (поперек волокон, с нагревом и увлажнением) предполагают последующую сушку заготовки в спрессованном состоянии и ее охлаждение. Отсутствие же предварительной влаготеплообработки позволяет избежать включения этих дополнительных операций в технологический процесс).

По изученным источникам можно сделать вывод, что структура прессованной вдоль волокон древесины недостаточно исследована, отсутствуют данные по изменению структуры хвойных пород. В целом на структуру прессованной древесины оказывают влияние порода, температура и влажность древесины.

1.2.2.2 Предпосылки применения способа холодного торцового прессования древесины.

П.Н. Хухрянский установил, что уплотнение древесины повышает ее прочность, если оно не связано с разрушением клеток [196, 292-294]. Во втором положении теории прессования, разработанной П.Н. Хухрянским, указано, что прессовать следует поперек волокон. Считалось, что прессование вдоль волокон проводить нерационально, поскольку в результате деформации клетки как с толстыми, так и с тонкими оболочками уплотняются в одинаковой степени; при этом разница в плотности и прочности структурных элементов, свойственная натуральной древесине, сохраняется. Вместе с тем, как показывают исследования [95, 114, 137], при торцовом прессовании происходит переориентация клеток: изменяется положение клеток относительно вертикальной оси. Клетки с тонкими оболочками деформируются в большей

степени, чем с толстыми; разница в плотности ранних и поздних слоев древесины уменьшается; структура древесины становится более равномерной.

В работах [12, 20, 95, 196, 290, 292-294] приводятся величины возможной деформации ε древесины: при поперечном прессовании с предварительной влаготеплообработкой $\varepsilon = 0,50 - 0,75$; при равномерном торцовом прессовании сухой холодной древесины $\varepsilon = 0,20 - 0,30$; при равномерном торцовом прессовании влажной нагретой древесины $\varepsilon = 0,30 - 0,40$ [196, 292-294].

Величина возможной деформации древесины при прессовании и качество получаемых заготовок тесно связаны с наличием и режимами обжима заготовок [114, 385]. При торцовом прессовании древесины сосны в обойме величина относительной пластической деформации может достигать $\varepsilon = 0,10 - 0,60$. Неравномерное (местное) торцовое прессование позволяет достичь деформации $\varepsilon = 0,47 - 0,60$ без предварительного нагрева и пропаривания древесины [114]. Обжим заготовок при холодном торцовом прессовании способствует снижению риска возникновения микротрещин [114, 119, 120, 259, 261, 289].

В третьем положении теории Хухрянского указано, что прессовать древесину необходимо в размягченном состоянии с последующей сушкой и охлаждением деформированной древесины [196, 292-294]. Сжатие влажной нагретой древесины протекает в основном за счет упругой деформации, поэтому затем древесину необходимо высушить для закрепления ее формы [72]. Сжатие же сухой древесины протекает главным образом за счет пластической деформации, поэтому не требует последующей тепловой обработки. В дополнение к этому, в смолистых хвойных породах процесс перерождения пластической деформации в упругую тормозится смолой [114, 120].

Таким образом, холодное торцовое местное прессование при использовании обжима может обеспечить формирование качественных проушин за счет пластической деформации древесины до $\varepsilon = 0,60$, без использования последующей тепловой обработки.

1.2.3 Параметры режимов прессования

1.2.3.1 Степень прессования древесины.

Степень прессования взаимосвязана с деформациями, возникающими в древесине. Степень прессования древесины определяют по изменению геометрических размеров прессуемого образца [196, 292-294]:

$$\varepsilon = \frac{h_0 - h}{h_0}, \quad (1.1)$$

$$\varepsilon_0 = \frac{h_0 - h}{h}, \quad (1.2)$$

где ε – степень прессования по отношению к начальному размеру;

h_0 – начальный размер бруска (высота) в направлении прессования, мм;

h – конечный размер (высота) бруска в направлении прессования, мм;

ε_0 – степень прессования по отношению к конечному размеру.

Степень прессования ε (ε_0) является средней степенью прессования для сечения бруска. Фактическая, или истинная, степень прессования на отдельных участках поперечного сечения бруска отличается от средней. Величина степени прессования может достигать значения $\varepsilon = 0,70$ [275, 293].

При поперечном прессовании деформация древесины протекает в три фазы. Связь между напряжением и деформацией при поперечном прессовании представлена на рисунке 1.6 [35]. В первой фазе прессования ($\varepsilon \leq 6\%$) древесина находится в стадии упругой деформации сжатия клеток. Во второй фазе прессования тонкие стенки клеток ранней древесины деформируются и наступает стадия пластической деформации при $\varepsilon \approx 6 - 30\%$. При $\varepsilon \approx 30 - 50\%$ начинают деформироваться более толстые стенки клеток поздней древесины и уплотняются полости клеток, деформированных в начале второй фазы. В третьей фазе, при $\varepsilon > 50\%$, напряжения в древесине продолжают расти, не вызывая значительных деформаций, в связи с высоким сопротивлением сжатию древесного вещества.

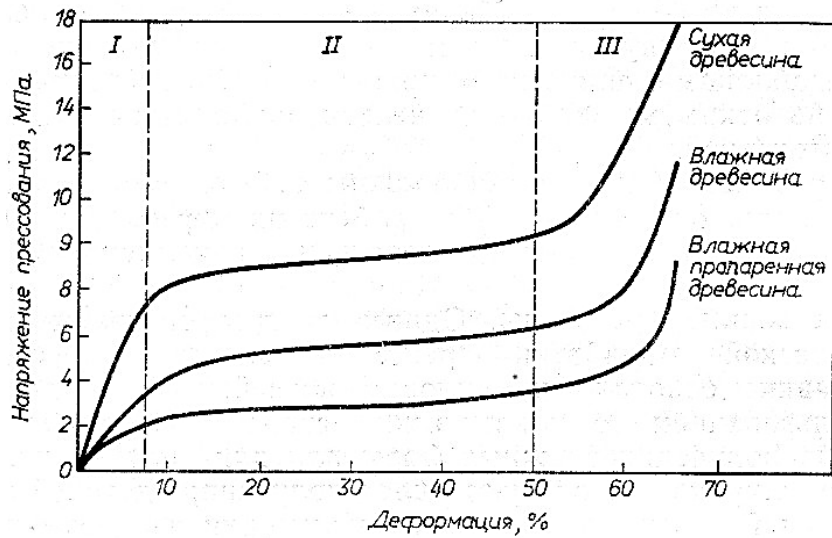


Рисунок 1.6 – Зависимость деформации от напряжений при поперечном прессовании древесины: I, II, III – фазы деформации [35]

В работе [275] приведены две типичные диаграммы сжатия, отражающие связь между напряжениями и деформациями (рисунок 1.7). Это однофазная и трехфазная диаграммы сжатия древесины поперек волокон. Обе имеют начальный, почти прямолинейный участок, соответствующий упругой деформации древесины, и пиковую точку напряжений в начале второго участка, соответствующую моменту потери устойчивости анатомических элементов древесины и началу пластической деформации древесины.

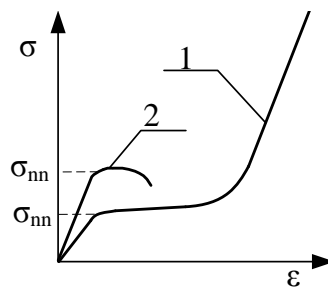


Рисунок 1.7 – Диаграммы сжатия древесины поперек волокон:
1 – трехфазная; 2 – однофазная [275]

Однофазная диаграмма характерна для древесины хвойных пород при сжатии в тангенциальном направлении, когда усилие воспринимают одновременно ранние и поздние зоны годовичных слоев, а наибольшие напряжения

возникают в жестких поздних зонах. Диаграмма подобного вида характерна также для свободного сжатия древесины различного макростроения вдоль волокон, так как в этом случае усилие также воспринимают как ранние, так и поздние зоны.

В любой фазе сжатия общая деформация ε складывается из упругой ε_y и пластической ε_n [196, 275, 292-294]. В работе [114] приведены графики зависимости напряжения от деформации древесины в различных направлениях относительно волокон (рисунок 1.8). Приведена диаграмма внедрения индентора вдоль волокон (3). На ней можно отметить два характерных участка: прямолинейный участок упругой деформации до пиковой точки напряжения в момент потери устойчивости поздней зоны и плавный участок кривой, соответствующий пластической деформации.

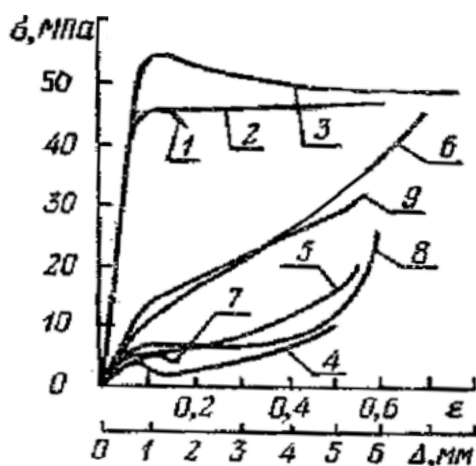


Рисунок 1.8 – Диаграммы прессования древесины сосны: 1 – свободное сжатие вдоль волокон; 2 – торцовое прессование в обойме; 3 – внедрение индентора вдоль волокон; 4 – свободное сжатие в радиальном направлении; 5 – прессование в радиальном направлении в обойме; 6 – внедрение индентора в радиальном направлении; 7 – свободное сжатие в тангенциальном направлении; 8 – прессование в тангенциальном направлении в обойме; 9 – внедрение индентора в тангенциальном направлении [114]

По результатам исследований процессов прессования древесины [11, 12, 16, 20, 23, 24, 26, 30, 86-90, 95, 98-100, 114, 120, 122, 124, 130, 136, 137, 153, 154, 177, 178, 182, 196-199, 239, 240, 269, 275, 278, 290, 292-294, 337,

385], установлено, что степень прессования ε растет с увеличением напряжений и уменьшается с увеличением модуля упругости, вязкости и скорости нагружения. В целом, ε является функцией от ряда характеристик древесины и процесса прессования $\varepsilon = f(h, h_0, W, \rho_w, E_a, \mu_{ra}, \mu_{ta}, G_{rt}, \sigma_a, \sigma_r, \sigma_t, \tau_{rt}, \eta, \nu)$, изучение которых необходимо для описания процесса холодного торцового местного прессования.

1.2.3.2 Усилие прессования.

П.Н. Хухрянский установил, что при прессовании древесины в пресс-формах, ограничивающих боковое расширение прессуемого бруска, усилие прессования P_f складывается из усилия P_s , необходимого для свободного (без пресс-форм) прессования древесины, и силы трения древесины T_m о стенки пресс-формы [35, 196, 292-294]:

$$P_f = P_s + 2T_m \quad , \quad (1.3)$$

где 2 – коэффициент, учитывающий количество ограничивающих стенок пресс-формы;

$$P_s = w\sigma_x = SB\sigma_x \quad , \quad (1.4)$$

где w – площадь прессования;

S – толщина заготовки;

B – ширина заготовки;

σ_x – напряжение в древесине на глубине x ;

x – первоначальное расстояние от передающей давление поверхности до рассматриваемого элементарного слоя.

С некоторыми допущениями [293] можно принять, что характер связи между напряжением и степенью прессования в пресс-форме такой же, как и при безматричном прессовании. В этом случае P_f можно представить в виде следующего соотношения:

$$P_f = \sigma_x BS \left(1 + 2f_m \mu \left(1 - \varepsilon \right) \frac{h_0}{S} \right) \quad . \quad (1.5)$$

Анализируя выражение (1.5), отметим: на величину усилия прессования влияют размеры заготовки, коэффициенты трения и поперечной деформации. По исследованиям, приведенным в работах [196, 292-294], величины $f_m, f_{op}, \mu_{ra}, \mu_{ca}$ для определенной породы зависят от влажности древесины W , ее температуры t , скорости прессования v , поэтому усилие прессования является функцией от ряда параметров: $P = f(\varepsilon, W, t, B, S, h_n, v)$.

При прессовании пропаренной древесины коэффициент трения снижается за счет смазки водой, выдавливаемой из древесины. Для прессования предварительно нагретой древесины коэффициент трения снижают путем обмазывания брусков парафином. При прессовании холодной сухой древесины, величина и соответственно доля силы трения в итоговой величине усилия будет выше.

Под влиянием распирающего усилия, действующего на боковые стенки пресс-формы при одноосном прессовании древесины, может происходить изгиб боковой стенки пресс-формы [196, 292-294]. Расчет распирающего усилия в работе [293] предложено производить по формуле (1.6):

$$T = \frac{P}{2f} \left(1 - e^{-2 \frac{l}{w} h \cdot f \cdot \mu} \right) . \quad (1.6)$$

Таким образом, изучение источников позволило установить основные параметры процесса прессования: степень и усилие. Степень прессования древесины зависит от следующих факторов: температуры и влажности древесины, глубины получаемой проушины, породы, скорости прессования. Усилие прессования зависит от породы, температуры и влажности древесины, ширины получаемой проушины и толщины заготовки, степени и скорости прессования.

1.3 Подходы к оценке качества шиповых соединений

1.3.1 Показатели качества шиповых соединений

Номенклатура показателей качества продукции с использованием клеевых соединений впервые была приведена в ряде разработанных стандартов и нормативно-технических документов, часть из которых позднее были доработаны (или обновлены, заменены): РД 50-165-82, ГОСТ 4.223-83, ГОСТ 4.226-83, ГОСТ 4.208-79 и ГОСТ 20850-84 (замененные на 20850-2014), ГОСТ 475-78 (замененный на ГОСТ 475-2016), СНиП II-25-80 (СП 64.13330.2017) и др. [54-57, 64- 67, 193, 237, 241]. Лабораторией несущих клеевых деревянных конструкций ЦНИИСК им. В.А. Кучеренко разработаны стандарты организации для деревянных клеевых конструкций [249-255], включающие требования к качеству клеевых соединений. Критерии оценки качества шиповых соединений приводятся также в нормативных и научно-технических источниках [32, 44, 45, 53, 60, 73, 96, 113, 115, 116, 132, 133, 183, 231, 246].

Вопросами качества клеевых соединений занимались А.Н. Чубинский, Л.М. Ковальчук, А.С. Фрейдин, К.Т. Вуба, Ю.М. Иванов, С.Н. Пластинин, В.М. Попов, В.А. Куликов, Л.М. Сосна, Н.А. Гончаров, В.М. Хрулев, Г.С. Варанкина, А.А. Тамби, В.Н. Волынский, А.Г. Гороховский, M.D. Strickler, R.W. Jokerst, H.S. Ryu, A.N. Tankut, Y.Z. Erdil, A. Kasal, E. Naviarova, R.L. Aman, T. Biechele, S. Prekrat, J. Smardzewski, E. Likos, C.A. Eckelman, A. Frangi, I. Barboutis, V. Vasileiou, I. Džinčić, D. Živanić, M. Brabec, M. Derikvand, V.S. Kumar, C.M. Sharma, A.J. Lara-Bocanegra, W.G. Hu и др. [22, 32, 35, 99, 107, 116, 127-129, 145, 174, 181, 183, 187, 236, 249, 250, 284, 287, 298, 308, 312, 315, 317, 324-329, 332, 335, 339-341, 349, 358, 366, 377, 378, 382, 383, 391]. В этих источниках изучены такие показатели качества шиповых соединений, как их прочность, точность формирования шипов,

толщина клеевого слоя, зазор в стыках и др. Основным показателем качества клеевого соединения является его прочность [2, 18–20, 29, 30, 33, 35, 37].

1.3.2 Методы оценки и прогнозирования прочности клеевых соединений

Существует несколько подходов к оценке прочности клеевых соединений древесины. По сфере применения их можно разделить на следующие группы (рисунок 1.9):

- расчетные методы, применимые на стадии проектирования соединения и используемые для прогнозирования механических свойств;
- экспериментальные методы, применимые на стадии изготовления соединений к образцам реальных, либо специально подготовленных размеров.

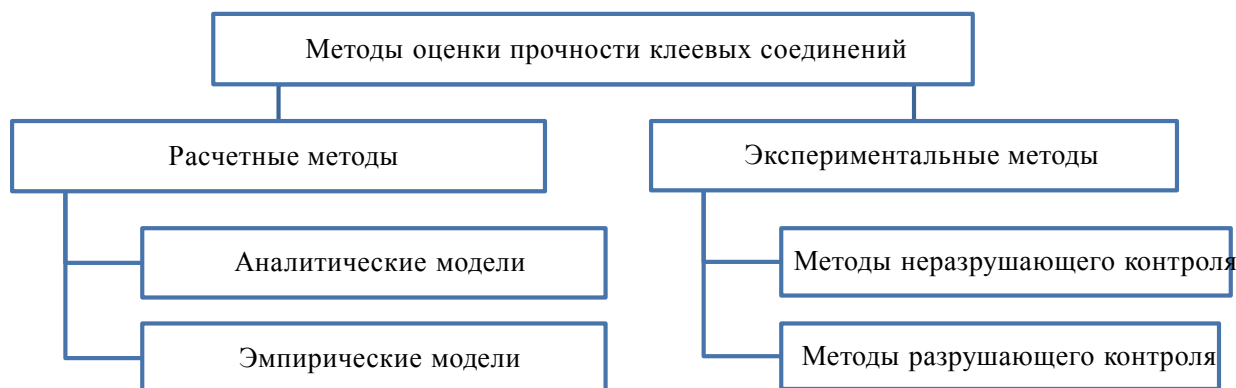


Рисунок 1.9 – Методы оценки прочности клеевых соединений

К первой группе относятся методы, основанные на использовании аналитических или эмпирических моделей. В частности, разработаны методы расчета клеевых соединений на сдвиг З.Е. Шнуровым, А.Л. Рабиновичем, И.А. Скорым и другими учеными [284]. И.А. Скорый и В.А. Кузьменко предложили метод расчета прочности на неравномерный отрыв. Е.М. Знаменский получил математическую модель для расчета напряжений при скалывании [284]. Данные модели имеют ограниченное применение, поскольку получены

для отдельных изученных случаев и не могут охватить все разнообразие соединений.

К этой же группе принадлежит и метод конечных элементов, реализуемый на базе 3D-моделирования [340, 355]. Метод достаточно эффективен при прогнозировании прочности соединений с изначально заданными характеристиками. Однако при практическом его применении встречаются затруднения, связанные с анизотропностью, вариативностью, возможными случайными отклонениями свойств древесины [344].

Экспериментальные методы второй группы позволяют сконцентрироваться на свойствах конкретной партии образцов. К ней относятся методы неразрушающего контроля прочности, которые могут быть применены к соединениям реальных размеров, расположенным в готовых изделиях, и использоваться для сплошного контроля. К таким методам относятся звуковые (акустические) методы на основе ультразвуковой дефектоскопии, радиоскопические, оптические и другие методы. Эти методы позволяют проводить оценку с достаточной степенью точности [317]. Но при их использовании появляется необходимость разработки стандартизованных методик и применения узкоспециализированного оборудования.

Вторая группа также включает стандартизованные методы оценки прочности, основанные на выборочных испытаниях типовых образцов механическим разрушением, которые принято проводить для однородной продукции при фиксации определенных установленных исходных данных: породы древесины [312, 332, 341, 349, 359, 365, 387], геометрических параметров соединения [326, 341, 330, 352, 327, 328, 365, 390], типа клея [341, 332, 352, 366, 387]. При проектировании и изготовлении опытных образцов соединений нового типа такие испытания наиболее целесообразны ввиду их простоты, информативности, адекватности результатов.

Методы испытаний образцов варьируются в зависимости от назначения клееных заготовок, условий их эксплуатации. Прочность склеивания, как правило, оценивается предельным усилием, вызывающим разрушение образ-

ца. Применяют испытания на сдвиг (скалывание), растяжение (отрыв), изгиб, кручение. Многие стандарты на изделия с применением клеевых соединений по длине относят к числу основных требования к прочности при изгибе и растяжении [54, 57, 59].

Методики испытаний соединений на прочность при изгибе и растяжении установлены ГОСТ 15613.5-79, ГОСТ 15613.4-78 и ГОСТ 33120-2014, разработанном на основе требований ГОСТ 15613.1-84 и 15613.4-78 [43-45, 63]. Сущность методов определения предела прочности зубчатых клеевых соединений при продольном растяжении и при статическом изгибе заключается в измерении нагрузки, разрушающей образец, и вычислении напряжения, возникающей в образце при этой нагрузке.

1.3.3 Факторы, влияющие на качество шиповых соединений

Опыт применения клеевых соединений показывает, что правильно выполненные соединения не ухудшают качества изделия, а во многих случаях повышают формоустойчивость и прочность заготовок по сравнению с массивной древесиной. На прочность соединения оказывают влияние прочность клеевого шва и прочность древесины, точность и качество поверхности элементов соединения, толщина клеевого слоя. Значительное влияние на прочность соединения оказывает конструкция и размеры соединения, длина и расположение клеевого шва относительно направления волокон [96].

Анализ информации, изложенной в работах [32, 96, 107, 127-129, 181, 190, 298, 330], позволил выявить несколько групп основных факторов, влияющих на прочность соединения и разработать их классификацию (рисунок 1.10). При этом прочность рассматривалась как показатель качества клееной продукции и как критерий выбора параметров шипового соединения при принятии проектных решений производителем.

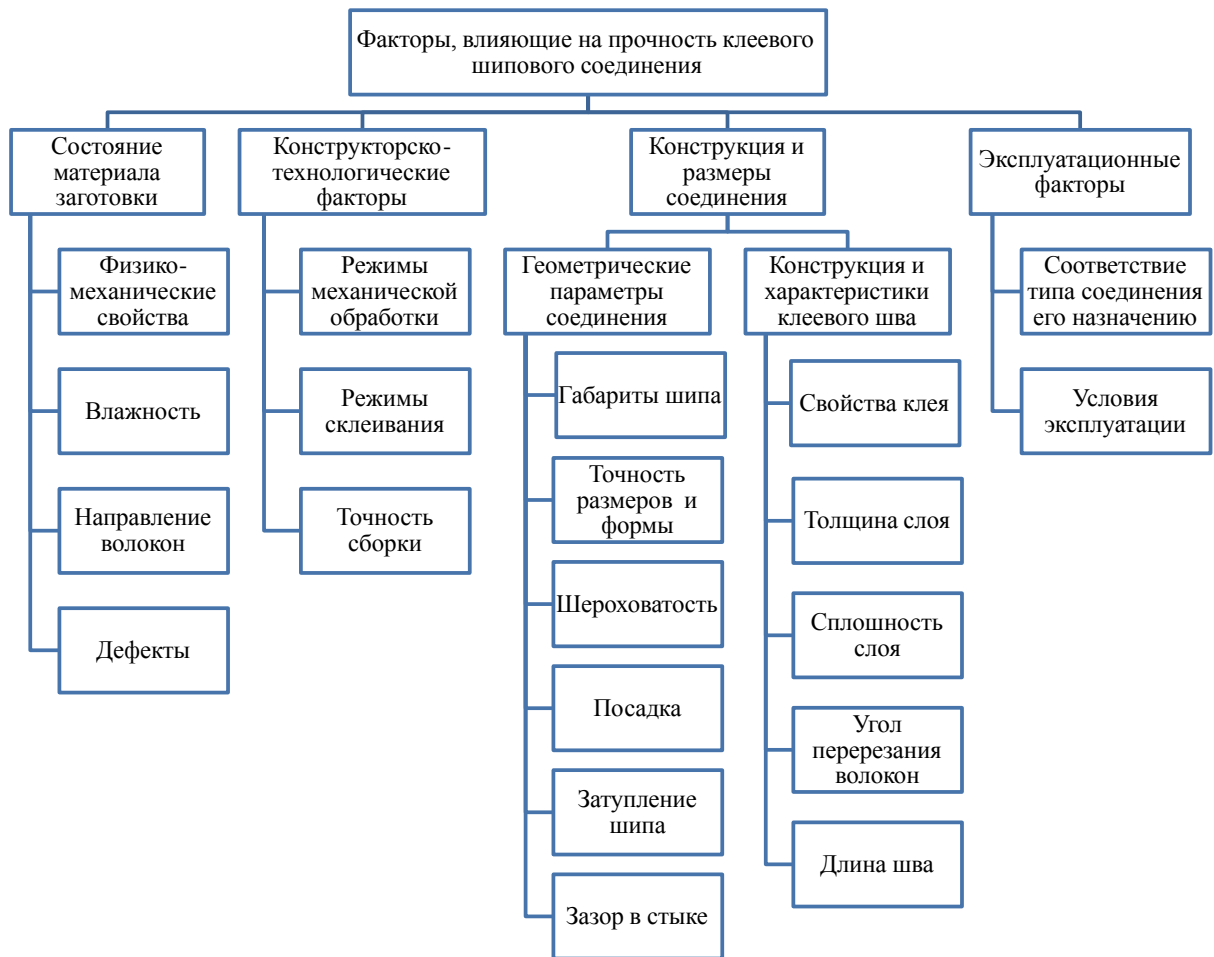


Рисунок 1.10 – Классификация факторов, влияющих на прочность клееного шипового соединения

На качество работы шипового соединения в определенных условиях эксплуатации влияют как процесс его изготовления, так и соответствие параметров соединения условиям эксплуатации. Классификация, приведенная на рисунке 1.10, предназначена для структурирования с точки зрения производителя конструктивных, технологических и эксплуатационных факторов, влияющих на прочность соединения в процессе его использования по назначению, с целью их дальнейшего поэтапного анализа и может служить информационной базой в процессе выбора требуемых параметров соединения.

Основанием для проведения классификации в данной ситуации служит жизненный цикл продукции [76], включающий следующие основные, с точки зрения производителя, этапы: проектирование соединений, приемка материалов, изготовление и дальнейшая успешная эксплуатация продукции в запла-

нированных условиях. Таким образом, к основным группам факторов, влияющим на выбор параметров оптимального по прочности соединения, можно отнести состояние материала заготовки, конструкторско-технологические факторы, конструкцию и размеры соединения, эксплуатационные факторы.

Среди указанных групп факторов наиболее значимой на этапе проектирования является группа «Конструкция и размеры соединения». Единичные и комплексные факторы, входящие в эту группу, в работах [32, 96, 312, 341, 332, 359, 365, 369, 386] отнесены к наиболее важным с точки зрения прочности соединения. При одном и том же состоянии материала детали и клея это, в частности, геометрические параметры соединения, например, размеры шипов, посадки; также это длина клеевого шва, его расположение относительно направления волокон древесины.

При составлении классификации, предназначенной для удобного выбора параметров соединения производителем, необходимо учесть отдельные показатели, приведенные в нормативной документации, например, «затупление шипа» и «зазор в стыке» [53], несмотря на их взаимозависимость, поскольку именно они используются производителем при выборе параметров и контроле качества изготовления соединений. При этом некоторые факторы, приведенные в классификации рисунке 1.10, являются независимыми для шиповых соединений по длине на прямоугольные шипы, но взаимосвязанными для традиционных зубчатых соединений, например, угол перерезания волокон и длина клеевого шва; величина затупления шипа и зазор в стыке; точность изготовления соединения, тип посадки и толщина клеевого шва. В связи с этим указанные подгруппы рассматриваются ниже в комплексе.

1.3.3.1 Угол перерезания волокон и длина клеевого шва.

Исследованиями [96, 349], установлено, что наибольшая прочность соединения достигается при склеивании боковыми поверхностями на гладкую фугу (рисунок 1.11 *a*). Однако простое соединение заготовок внахлестку является несоосным, поэтому создание скошенных поверхностей в традицион-

ных соединениях на ус явилось вынужденной и наиболее очевидной мерой для обеспечения соосности сращивания [96], хотя перерезание волокон и впитывание клея несколько ослабляют соединение (рисунок 1.11 б). С увеличением длины шва и уменьшением угла перерезания волокон прочность возрастает [307]. Для достижения высокой прочности клевого шва рекомендуется, по данным В. П. Жукова, обеспечивать его длину равной не менее 8–10 толщин заготовки [96], а по мнению В. Н. Волынского, 10–15 толщин [32]. Вместе с тем по данным [387] уклон, меньший, чем $1/12$ не повышает или дает незначительный прирост прочности и потому не рационален. Эти соотношения соответствуют углам перерезания волокон от $3,81^\circ$, $4,78^\circ$ до $7,13^\circ$ для уклонов $1/15$, $1/12$ и $1/8$ соответственно.

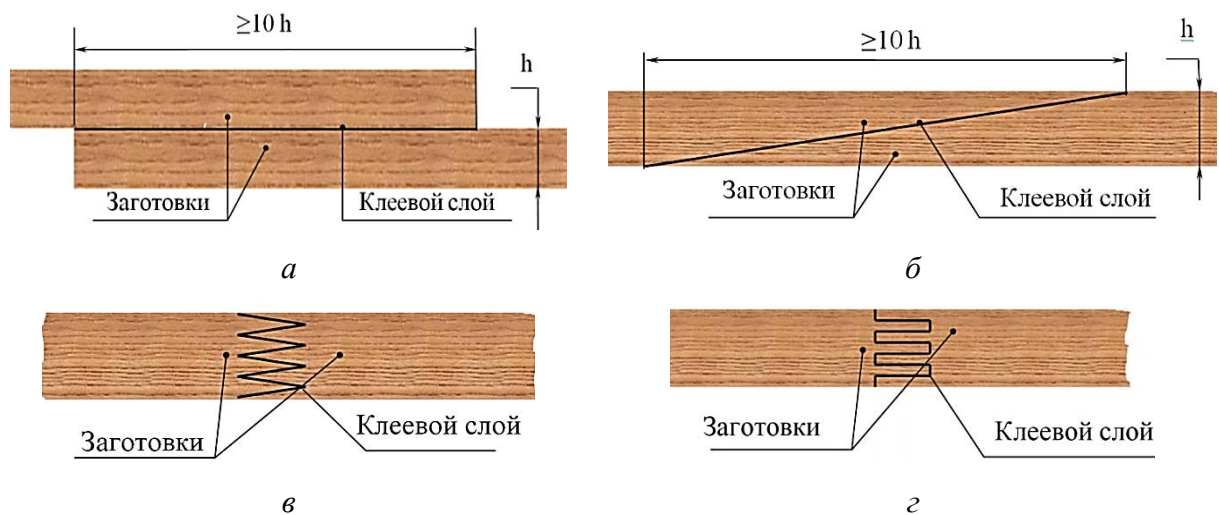


Рисунок 1.11 – Соединения по длине с теоретически равной прочностью:
а – внахлестку; *б* – на ус; *в* – на зубчатый шип; *г* – на прямоугольный шип

Видоизменение усового соединения в зубчатое с сохранением угла наклона и площади склеивания (рисунок 1.11 в) теоретически сохраняет его прочность [181]. Подобно усовым сопряжениям, для зубчатых шипов также характерно значительное возрастание прочности при увеличении длины зубьев и соответственно длины клевого шва [32, 359, 332, 386]. Наилучшими по указанным характеристикам соединениями среди применяемых можно считать соединения по ГОСТ 19414-90 с большими значениями длины зуба –

32, 50 мм; в лабораторных условиях возможно получить еще более рациональные геометрические характеристики шипов [387] (см. таблицу 1.1).

Таблица 1.1 – Параметры зубчатых шипов

Размеры шипа: длина × шаг × затупление, мм	Источник	Угол перерезания волокон, град.	Относительная длина клеевого шва (в толщинах заготовки)
50×12×2	[53]	5,71	8,37
32×8×1	[53]	7,13	8,05
20×6,2×1	[53]	7,41	6,51
10×3,8×0,6	[53]	9,09	5,33
4×1,6×0,2	[53]	9,93	5,08
15×3,2×1,2	[387]	3,81	9,39
10×3,8×0,8	[283]	8,53	5,32
12×6,2×0,8	[283]	12,68	3,97

На практике при изготовлении зубчатых шипов с малым уклоном и длиной шва более 8 толщин заготовки существуют затруднения по технологическим причинам. Реально достижимая длина клеевого шва составляет от 5 толщин заготовки при тупых шипах до 6,5 – 7 толщин при удлиненных зубьях и среднем их затуплении [183], что снижает их прочностные показатели, поскольку увеличивается угол наклона поверхности зуба (угол перерезания волокон) [96, 181, 312]. Так, геометрические параметры зубчатых соединений по ГОСТ 19414-90 [53] с длиной шипа 20 мм и менее имеют угол перерезания, больший 7,4°, и длину клеевого шва, меньшую 6,5 толщин заготовки (см. таблицу 1.1). Распространенные в России типоразмеры фрез для изготовления зубчатых мини-шипов [283] могут иметь еще менее предпочтительные параметры (см. таблицу 1.1).

При этом даже правильно спроектированные и выполненные соединения показывают снижение прочности склеенной заготовки по сравнению с прочностью массивной древесины: 69 % [387], 65–75 % [32], 83 % [341].

Сравнительно малый угол скоса и острые концы зубчатых шипов затруднительно получить в производственных условиях: малая толщина режущей части фрез приводит к быстрому нагреву и износу, требует частой переточки. Проектирование конструкций фрез с учетом этих моментов является причиной затупления вершин шипов. По рассмотренным показателям инструмент для формирования шипов прямоугольной формы, в том числе пуансоны для прессования, является более выигрышным. Длина образуемых элементов шипового соединения в этом случае не будет иметь ограничений, связанных с углом скоса (рисунок 1.11 з).

Необходимо отметить, что тенденция возрастания прочности при увеличении длины шипа характерна для большинства типов клеевых шиповых соединений, в том числе для угловых концевых соединений на прямоугольные шипы [324, 325, 329, 382]. Длина шипа для них, как и для соединений по длине, является наиболее значимым параметром [308, 316, 324, 325, 391, 390]. Таким образом, увеличение длины прямоугольного шипа является потенциалом для повышения прочности соединений по длине.

1.3.3.2 Величина затупления шипа и зазор в стыке.

Величина затупления с учетом шага шипа влияет на степень ослабления прочности соединения [32, 332]. На практике часто применяются соединения на шипы длиной от 10 мм с величиной затупления от 0,2 – 0,5 мм до 0,8 – 1 мм [32, 283, 330, 358, 386]. Относительная прочность соединений с затуплением не превышает 65 – 75% [32]. Исследования влияния затупления конца зуба на прочность показали, что увеличение затупления до 3 мм снижает прочность соединения при растяжении и изгибе до 40 – 50 % прочности чистой древесины [287]. Это связано с наличием зазора в местах затупления, что уменьшает площадь склеивания, а также вызывает концентрацию напряжений [341], что в итоге ослабляет прочность соединения.

Величина зазора в стыке между затупленной вершиной шипа и ответной проушиной оказывает значительное влияние на прочность шипового со-

единения [327, 386]. С другой стороны, наличие зазора является необходимой технологической мерой для обеспечения плотного прилегания склеиваемых наклонных поверхностей зубчатого шипа в процессе запрессовки [32].

Неизбежное ослабление прочности из-за зазора в стыке между затупленной вершиной шипа и ответной проушиной, характерное для зубчатых соединений, в прямоугольном шиповом соединении может быть сведено к минимуму при условии обеспечения более высокой точности изготовления соединения. Как показали экспериментальные исследования автора [227], способ холодного торцового прессования позволяет достичь 11 квалитета точности изготовления шипов. Кроме того, в прямоугольных шиповых соединениях, в отличие от зубчатых, преимущественное значение при сопротивлении нагрузке будут иметь клеевые швы вдоль волокон по граням шипов. Торцовые стыки между дном проушин и торцами шипов будут иметь второстепенное влияние, сказываясь в основном на эстетике соединения. Тогда задачей становится технологическое обеспечение изготовления соединений достаточной точности, что позволит минимизировать возможные зазоры.

1.3.3.3 Точность изготовления, шероховатость поверхностей, тип посадки и толщина клеевого шва.

Вопросам выбора типа посадки, соединения, шероховатости поверхностей, точности изготовления и толщины клеевого шва в шиповом соединении посвящены работы многих исследователей [118, 127-129, 244, 324, 326, 329, 335, 339, 352, 388]. Установлено, что эти показатели существенно влияют на прочность соединений.

Существующие рекомендации [53, 73, 146, 190, 244, 301] разработаны для соединений по длине на зубчатые шипы либо для угловых соединений на прямоугольные шипы и не могут быть применены к соединениям по длине на прямоугольные шипы. Кроме того, данные показатели применимы к шипам, полученным способом фрезерования, и их применение для шипов и проушин, изготовленных другими способами, должно быть обосновано. Следова-

тельно, данный вопрос требует отдельного изучения и разработки соответствующих рекомендаций.

Таким образом, в число основных показателей качества шиповых соединений входит их прочность на растяжение и изгиб. Она зависит от ряда факторов: конструкции и размеров соединения, площади склеивания, точности и качества поверхности элементов соединения, типа посадки и связанной с ней толщины клеевого шва. Клеевые соединения по длине на прямоугольные прессованные шипы могут быть усовершенствованы в направлении повышения их прочности с учетом рассмотренных факторов. В частности, увеличение длины шипа и выбор рациональной посадки являются резервом для повышения прочности соединений по длине на прямоугольный шип.

1.3.4 Методы оценки эффективности технических решений

При выборе параметров шиповых соединений различного назначения, выборе оборудования для их изготовления и проектировании оснастки необходимо учитывать комплекс требований потребителя к изделию, производителя к условиям производства и существующих нормативных документов. В каждой конкретной производственной ситуации необходимо выбирать оптимальное соединение, оборудование, оснастку.

В случае, когда отсутствует систематизированная информация об альтернативных вариантах соединений, оборудования и оснастки, отсутствует методика и критерии их выбора, оптимальный вариант выбирается на основании опыта лица, принимающего решение. Такой выбор зачастую делается интуитивно, в пользу снижения себестоимости изготовления, но в ущерб качеству выпускаемой продукции. С другой стороны, нет необходимости завышать требования к изготавливаемым соединениям, иначе необоснованно будет увеличиваться стоимость изделия и усложняться техпроцесс. Таким образом, отсутствие научно обоснованного подхода к выбору параметров шиповых соединений различного назначения, оборудования и оснастки за-

трудняет выбор наиболее рациональных технико-экономических решений в области изготовления шиповых соединений.

Проблемами оценки эффективности технических решений занимались Ю.П. Анискин, Н.К. Моисеева, А.В. Проскуряков, Н.Н. Моисеев, И.В. Оптнер, И.В. Блауберг, А.И. Уемов, В.А. Блюмберг, Г.Г. Азгальдов, В.Ф. Глушко, Ф.И. Перегудов, А.В. Гличев, Ф.П. Тарасенко, А.И. Орлов, В.Д. Ногин, А.Р. Бриль, И.Т. Глебов и другие [2, 6, 13, 14, 27, 31, 33, 36, 69, 84, 94, 111, 142, 150-152, 155, 156, 161, 162, 176, 200, 233, 234, 245, 264, 276, 277, 281].

Повышение качества принимаемых проектных решений является одной из основных задач конструктора и технолога. Этого можно достичь за счет применения методов оптимального проектирования. Совокупность требований к соединению и условиям его изготовления позволяет учесть системное проектирование, базирующееся на системном подходе к решению задач [14, 31, 84, 94, 142, 233, 234, 296]. Анализ литературы [9, 32, 73, 96, 115, 116, 181, 183, 250, 251] не выявил научно обоснованной методики системного проектирования технологии изготовления соединений деревянных заготовок по длине.

В работе [14] приведен укрупненный алгоритм системного анализа, включающий блоки: определение проблемы, выявление целей, формирование критериев, генерирование альтернатив, построение и использование моделей, оптимизация; выбор; внедрение результатов анализа.

Одним из основных этапов системного проектирования является формирование критериев оценки – показателей качества сравниваемых альтернатив. В условиях рыночной экономики необходимо учитывать связь запросов потребителей и уровень качества продукции, то есть ее конкурентоспособность [264]. Для оценки конкурентоспособности продукции определяют ее технический уровень (на основе оценки отдельных показателей качества) и экономическую эффективность внедрения в производство.

Для решения многокритериальных задач по выбору соединений различного назначения, оборудования и оснастки необходимо использовать

научно обоснованные методы. Для этого можно применить методы снижения размерности, например, методы свертки, пороговых критериев, главного критерия (условной максимизации), парето-оптимальные решения, перевода части критериев в ограничения, исключения приближенно равных критериев и т.д. [6, 14, 148-152, 157, 162, 245, 264]. Для этих же целей применяются методы функционально-стоимостного анализа [21, 36, 150-152, 245].

Наиболее развитым современным способом лучшего варианта технического решения является применение методов квалиметрии. Основные положения квалиметрии, теория квалиметрии и практика ее использования изложены в работах Г.Г. Азгальдова, Ю.П. Адлера, В.Г. Белика, Г.Н. Бобровникова, А.В. Гличева, В.В. Кочетова, Г.Н. Солода, А.В. Субето, А.Г. Суслова, М.В. Федорова, И.Ф. Шишкина, В.К. Федюкина и других ученых и специалистов [2, 27, 40, 111, 156].

Применение квалиметрических методов позволит обосновать и формализовать процедуру выбора наилучших для заданных условий соединений, оборудования и оснастки. Квалиметрический анализ позволяет сравнить по качеству объекты, характеризующиеся определенным набором свойств. Показатель качества продукции – это количественная характеристика одного или нескольких свойств продукции, составляющих ее качество, рассматриваемая применительно к определенным условиям ее создания, эксплуатации или потребления. Номенклатура показателей качества изделий с использованием клеевых соединений приведена в ряде нормативных документов: ГОСТ 4.208-79 (замененный на ГОСТ 20850-2014), ГОСТ 4.223-83, ГОСТ 4.226-83, ГОСТ 475-78 (замененный на ГОСТ 475-2016), ГОСТ 20850-84 (20850-2014), СНиП II-25-80 (СП 64.13330.2017) и др. [54-57, 64-66, 67, 237, 241]. При анализе опубликованных работ не выявлено перечня показателей качества соединений по длине на прямоугольные шипы.

Показатели экономической эффективности рассмотрены в работах [92, 97, 189, 266, 305]. Одним из основных показателей является себестоимость изготовления соединений, складывающаяся из следующих статей: затраты на

материалы и комплектующие изделия (с учетом транспортно-заготовительных расходов) за вычетом реализуемых отходов; основная заработная плата производственных рабочих; дополнительная заработная плата производственных рабочих; расходы по содержанию и эксплуатации оборудования и транспортных средств; цеховые расходы; общезаводские (общехозяйственные) расходы; прочие производственные расходы; коммерческие расходы [92, 97, 189, 266, 305]. Таким образом, для сравнения себестоимости изготовления альтернативных вариантов соединений необходимо учесть изменение затрат на материалы, заработную плату и расходы на содержание и эксплуатацию оборудования. Эти показатели войдут в перечень частных критериев для оценки и выбора соединений различного назначения.

Таким образом, по проведенному анализу можно сделать вывод, что в опубликованных работах отсутствуют сведения о научно обоснованной методике оценки и выбора шиповых соединений различного назначения, оборудования и оснастки для их прессования. Решение многокритериальной задачи по выбору параметров соединения, оборудования и оснастки должно базироваться на систематизированной информации об альтернативных вариантах и системе критериев для оценки качества с точки зрения производителя и потребителя. Научно обосновать и формализовать процедуру выбора наилучших для заданных условий соединений, оборудования и оснастки позволит применение квалиметрических методов и методов оценки экономической эффективности.

1.4 Выводы. Задачи исследования

1.4.1 Соединение на многократные прямоугольные шипы является перспективным способом сращивания, обладающим рядом существенных преимуществ перед традиционными способами, включая возможность увеличения прочности за счет увеличения длины шипов и выбора рациональной посадки. Внедрение данного соединения в производство клееных заготовок

сдерживается отсутствием комплексных рекомендаций по выбору геометрических и точностных характеристик шипов.

1.4.2 Технология холодного торцового местного прессования является перспективной альтернативой, имеющей ряд преимуществ, процессам резания, традиционно применяемым для формирования элементов шиповых соединений. Внедрение данного способа сдерживается недостаточной изученностью процесса, отсутствием рекомендаций по технологическому обеспечению изготовления соединений достаточной точности, выбору инструмента, режимов обработки.

1.4.3 К основным характеристикам процессов прессования относятся степень и усилие прессования, степень изменения структуры древесины. В число основных влияющих на процесс факторов (для ранее изученных процессов) входят физико-механические свойства древесины, температура и влажность, размеры прессуемой заготовки и скорость прессования. Для обоснования технологических режимов местного торцового прессования необходимо исследование взаимовлияния указанных параметров.

1.4.4 В число основных характеристик качества шиповых соединений, разработанных для типовых соединений, входят показатели прочности. Их значения зависят от геометрических характеристик соединений, их точности, типа посадки. В опубликованной литературе отсутствуют аналогичные данные для прессованных прямоугольных шипов.

1.4.5 Проектная оценка и выбор параметров шипового соединения и технологии его изготовления влияют на эффективность процесса сращивания древесины. Решение данной многокритериальной задачи должно базироваться на систематизированной информации об альтернативных вариантах и системе критериев для оценки качества с точки зрения производителя и потре-

бителя, что требует разработки научно обоснованной методики оценки эффективности шиповых соединений.

1.4.6 На основании сделанных выводов сформулированы основные задачи исследования:

1) обосновать возможность применения способа местного торцового прессования для формообразования элементов шиповых соединений;

2) определить основные факторы, влияющие на процесс формирования проушин и теоретически обосновать его закономерности;

3) теоретически обосновать требования к точности изготовления элементов шиповых соединений;

4) установить степень влияния параметров соединений и режимов их прессования на энергосиловые и качественные характеристики процесса;

5) определить рациональные значения параметров режимов прессования, влияющих на качество шиповых соединений;

6) оценить качество соединений на прессованные шипы;

7) разработать методику оценки эффективности технологий сращивания по длине и провести оценку эффективности разработанной технологии сращивания на прессованные прямоугольные шипы.

2 ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ОБОСНОВАНИЕ ЗАКОНОМЕРНОСТЕЙ ФОРМИРОВАНИЯ ШИПОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ОСНОВЕ ТЕХНОЛОГИИ ТОРЦОВОГО ПРЕССОВАНИЯ

Цель раздела – теоретико-экспериментальное обоснование возможности формирования качественных проушин способом торцового прессования и получения шиповых соединений на основе прессованных шипов.

В разделе представлены результаты:

- экспериментальных и теоретических исследований возможностей и закономерностей процесса формообразования элементов шиповых соединений способом торцового прессования;
- моделирования процесса внедрения индентора в древесину;
- обоснования точности формирования соединений на прессованные шипы.

В целях структурирования диссертационной работы, удобства изложения материала и концентрации внимания на исследованиях раздела 2 основная информация о методиках экспериментальных исследований, характеристиках материалов и применяемого оборудования сведена ниже в разделе 3.

Представленные в разделе результаты исследований прошли апробацию и опубликованы автором в работах [102, 117, 119, 138, 173, 202, 203, 206, 207, 209, 210, 217-220, 224, 226, 227, 229, 260, 371, 372].

2.1 Исследование возможностей применения процесса местного торцового прессования для формообразования элементов шиповых соединений

Цель подраздела – исследовать процесс пластического деформирования древесины различного макростроения при внедрении призматического пуансона в торцовую поверхность образцов.

Задачи подраздела:

- исследовать этапы процесса деформирования древесины при внедрении призматического пуансона в торцовую поверхность образцов из древесины сосны, березы и дуба;

- изучить качественные изменения структуры древесины при внедрении призматического пуансона в образцы исследуемых пород с различной влажностью;

- определить граничные условия процесса местного торцового прессования.

2.1.1 Стадии процесса деформирования древесины при внедрении призматического индентора вдоль волокон

2.1.1.1 Деформирование и разрушение древесины при свободном сжатии вдоль волокон.

Поведение древесины при свободном сжатии вдоль волокон изучено достаточно подробно [26, 95, 114, 158, 196, 274, 275, 289-295, 363 381]. Установлено [274, 275], что при сжатии, растяжении и сдвиге объем древесного вещества, из которого образованы микроструктурные элементы, практически не изменяется; значительно меняются форма и объем самих клеток, за счет чего они деформируются. При этом изменения в микроскопическом строении древесины происходят только в зоне разрушения, в остальном объеме древесина остается неповрежденной [153, 275].

При свободном сжатии образцов как поперек, так вдоль волокон отмечается три основных фазы деформации древесины [158, 196, 274, 313, 314, 342, 361, 363, 381]. Первая, линейная фаза сжатия – это область упругих деформаций. Вторая фаза – начала деформации – наступает при достижении пикового напряжения. В этот момент происходит потеря устойчивости стенками клеток более прочной поздней древесины. Процесс продолжается в случае сжатия вдоль волокон до начала разрушения древесины (третья фаза) [370]. Оно выражается в сдвиге древесины [313, 314] с образованием складок

и трещин [378]. При этом в случае нагружения вдоль волокон разрушение древесины с образованием складок и трещин происходит без ее уплотнения [370].

При сжатии вдоль волокон позднюю древесину можно рассматривать как пластинку, опирающуюся на менее прочный и легко деформируемый слой ранней древесины. В процессе сжатия при достижении пикового напряжения, после потери устойчивости, происходит упругая деформация первого ряда клеток, прилегающего к пуансону. Сопротивление первого ряда клеток сначала падает, а затем снова возрастает до момента потери устойчивости клетками второго ряда клеток поздней древесины, что приводит к потере ими устойчивости и повторению процесса. При свободном (без обжима) сжатии вдоль волокон часть поздней древесины теряет устойчивость и изгибается в радиальной плоскости, а часть – в тангенциальной. В итоге при свободном сжатии сдвиг происходит в обеих плоскостях [275, 370].

Известно, что виды деформации и разрушения образцов отличаются в зависимости от макроструктуры древесины [275]. Типичными видами разрушения образцов древесины при сжатии вдоль волокон является: смятие торцов; косая складка; встречные косые складки с продольным расколом (рисунок 2.1). Форма разрушения зависит от прочности, жесткости, влажности древесины и связана с особенностями строения и анизотропией [275].

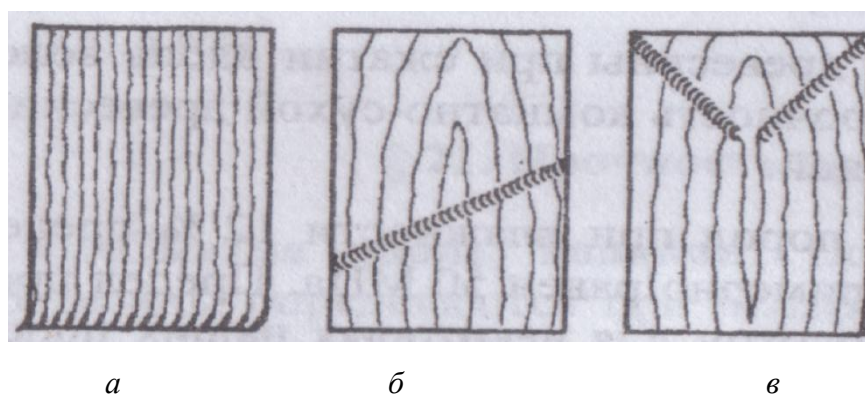


Рисунок 2.1 – Типичные виды разрушения образцов при сжатии вдоль волокон: *а* – смятие торцов; *б* – косая складка; *в* – встречные косые складки с продольным расколом [275]

На начальном этапе исследований изучены особенности деформирования и разрушения образцов из древесины сосны, березы, дуба при свободном сжатии вдоль волокон. Сжатие проводили по стандартной методике [47, 275]. Прочность образцов при сжатии вдоль волокон в пересчете на влажность 12 % для древесины сосны составила 48,8 МПа, березы – 54,3 МПа, дуба – 56,8 МПа. На рисунке 2.2 приведены фотографии образцов, разрушенных при сжатии вдоль волокон.

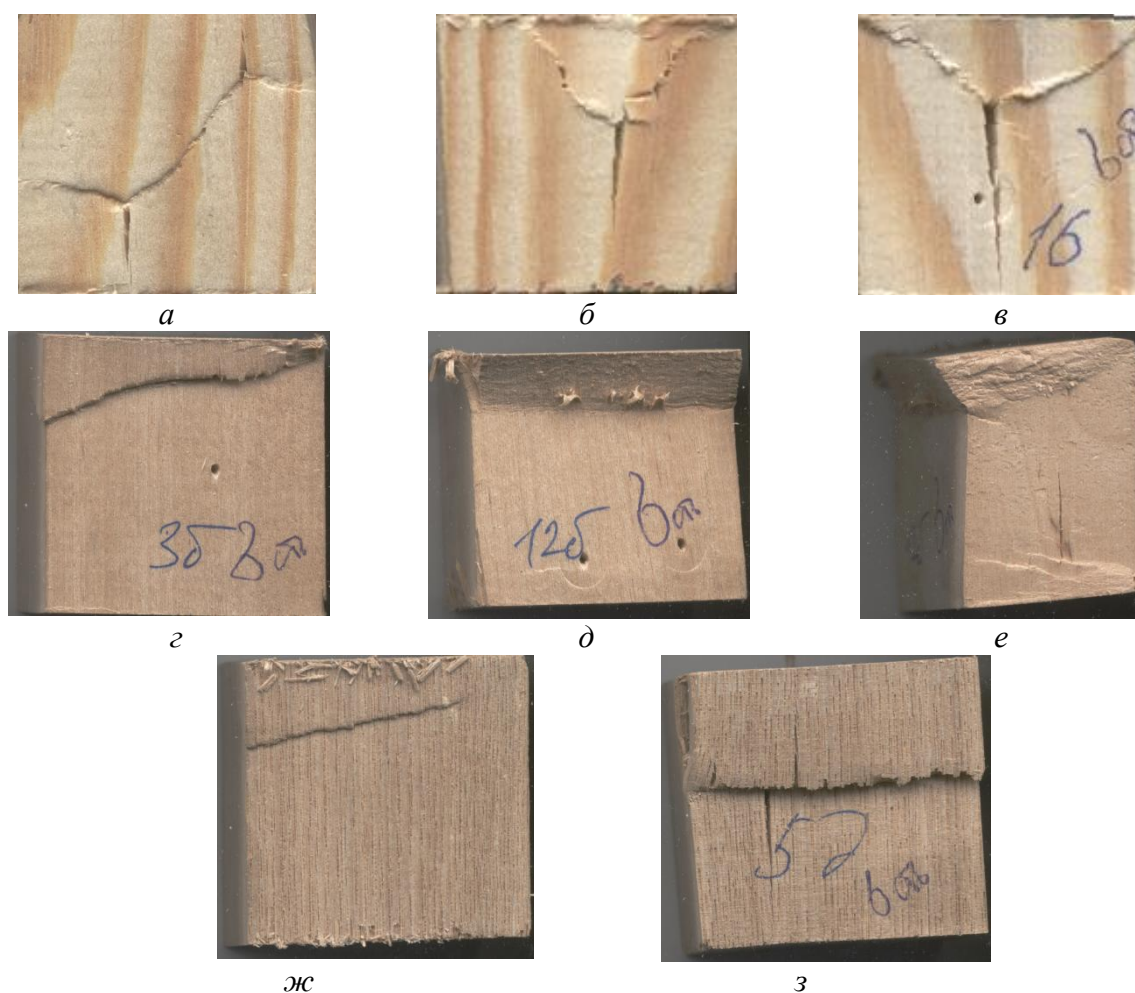


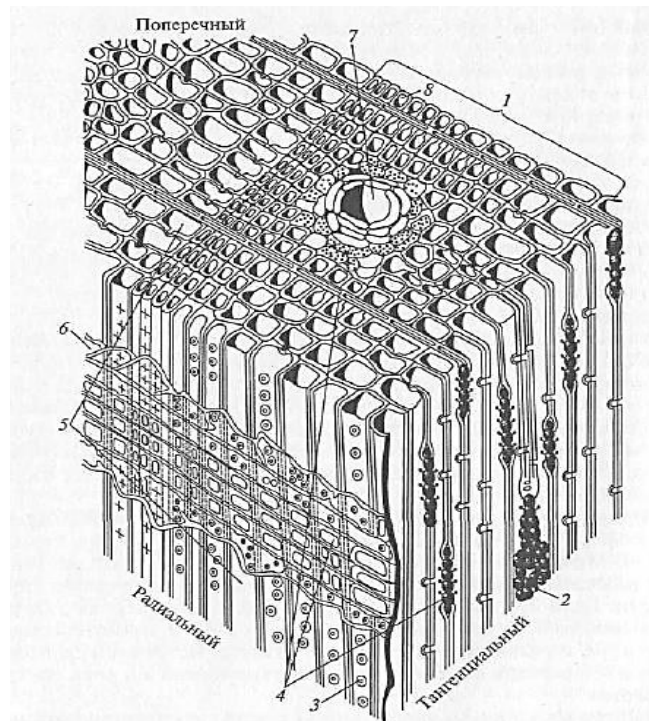
Рисунок 2.2 – Образцы, разрушенные свободным сжатием вдоль волокон:

а - в – из древесины сосны; *г - е* – из древесины березы;

ж, з – из древесины дуба

Типичная картина разрушения исследованных образцов из древесины сосны влажностью $W = 8 \div 18 \%$ – две встречные косые складки с располо-

женной ниже трещиной продольного раскола (рисунок 2.2 *а-в*). Это соответствует виду разрушения, приведенному на рисунке 2.1 *в*, и присуще жесткой сухой древесине [239, 275]. Это можно объяснить следующим. Сосна – типичная хвойная порода, приблизительно на 90 % состоящая из прозенхимных клеток с отмершим протопластом – трахеид (рисунок 2.2). Трахеиды собраны в радиальные ряды: крупнополостные трахеиды с тонкими стенками (ранняя древесина) сменяются трахеидами с малыми полостями и тонкими стенками (поздняя древесина). Поздняя древесина плотнее ранней, ее прочность и жесткость выше, чем аналогичные показатели у ранней древесины. При нагружении в процессе сжатия нагрузку в первую очередь воспринимают именно участки поздней древесины, что и дает наблюдаемую картину разрушения.

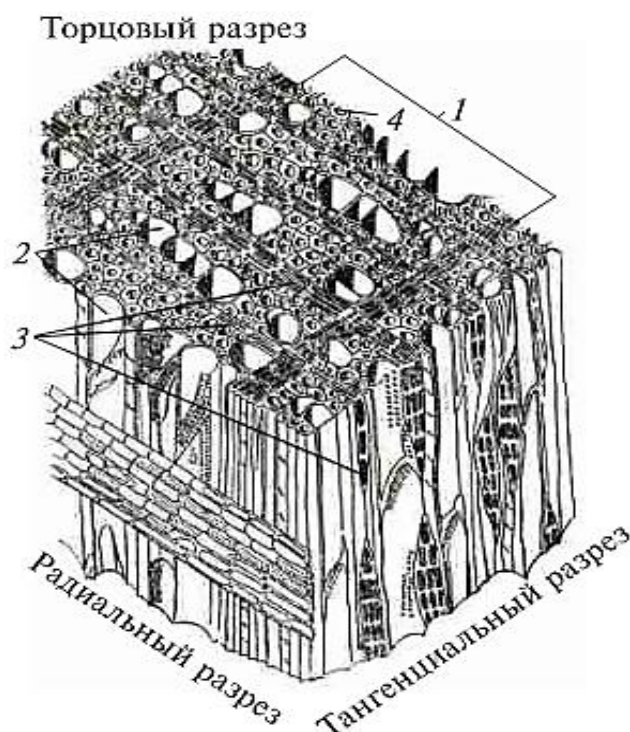


- 1 – годичный слой; 2 – многорядный луч с горизонтальным смоляным ходом;
 3 – окаймленная пора; 4 – сердцевинные лучи; 5 – ранние трахеиды;
 6 – лучевая трахеида; 7 – вертикальный смоляной ход; 8 – поздняя трахеида

Рисунок 2.2 – Схема микроскопического строения древесины сосны по В.Е. Вихрову [275]

Известно, что для различных пород угол наклона складки относительно поперечного сечения заготовок различается [301, 314]. Для наблюдаемых образцов угол составил от -7° до 55° .

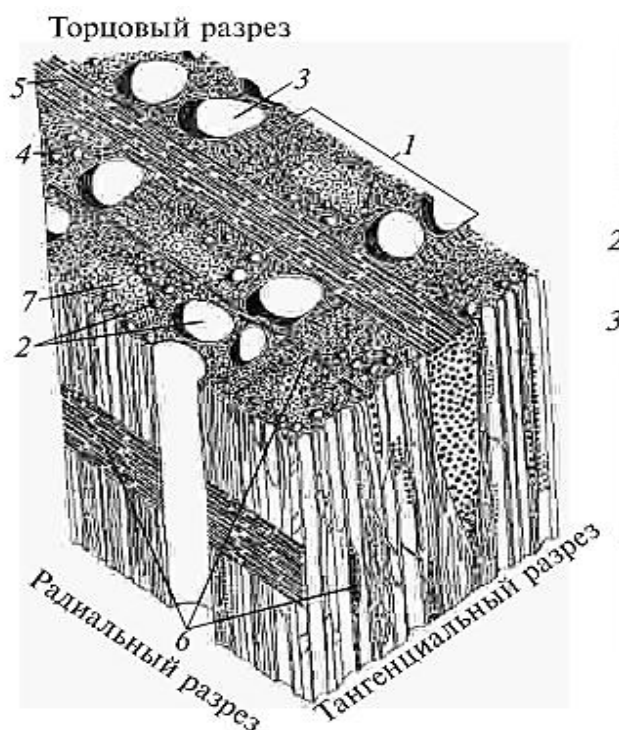
Типичной картиной разрушения образцов из древесины березы и дуба влажностью $W = 8 \div 18\%$ явились косые складки (рисунок 2.2 г, ж), что соответствует рисунку 2.1 б. Это также присуще породам с сухой древесиной повышенной жесткости [239, 275]. К ним относится и береза, и дуб. Дуб является типичной лиственной кольцесосудистой породой, береза – рассеяно-сосудистой. Древесина лиственных пород, в отличие от хвойных, состоит из большего набора основных анатомических элементов и их переходных форм, расположенных менее упорядоченно (рисунки 2.3, 2.4). Годичные слои у дуба хорошо заметны, граница между ранней и поздней зоной выражена менее явно. У березы годичные слои плохо заметны.



- 1 – годичный слой; 2 – мелкие сосуды;
3 – сердцевинные лучи; 4 – либриформ

Рисунок 2.3 – Схема микроскопического строения древесины березы по В.Е. Вихрову [175]

Известно, что у пород с древесиной повышенной жесткости, к которым относятся береза и дуб, при разрушении появляется косая складка, обычно расположенная под углом $60 - 70^\circ$ на тангенциальной поверхности образца [301]. Для наблюдаемых образцов этот угол составил от 50° до 73° .



- 1 – годичный слой; 2 – сосуды; 3 – крупный сосуд ранней зоны;
 4 – мелкий сосуд поздней зоны; 5 – широкий сердцевинный луч;
 6 – узкие сердцевинные лучи; 7 – либриформ

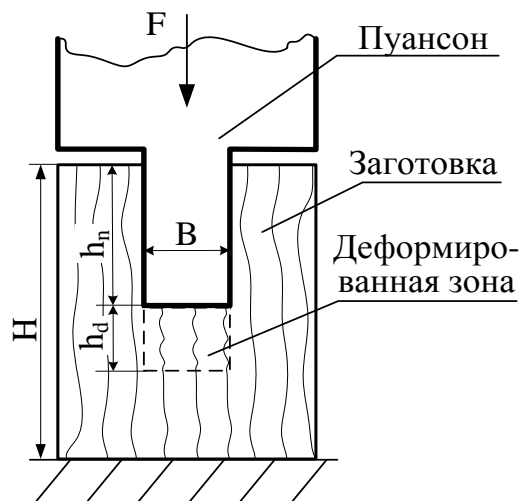
Рисунок 2.4 – Схема микроскопического строения древесины дуба по В.Е. Вихрову [175]

При увеличении влажности до 30 % прочность исследованных образцов из трех древесных пород снижалась до $\sim 50\%$ от первоначальных значений. При этом наблюдалось смятие торцов (рисунок 2.2 д, е), что соответствует виду разрушения, приведенному на рисунке 2.1 а.

Таким образом, установлено, что свободное сжатие сухих образцов ($W = 8 \div 18\%$) вызывает появление трещин и приводит к раскалыванию древесины. Повышение влажности до 30 % снижает усилие свободного сжатия древесины до 50 % и приводит к смятию древесины на торцах.

2.1.1.2 Деформирование древесины при внедрении призматического индентора.

На следующем этапе исследований проведена серия поисковых экспериментов по установлению основных стадий процесса деформирования древесины при внедрении инденторов призматической формы. Схема процесса представлена на рисунке 2.5. Пуансон с шириной B рабочей части внедряется в торцовую поверхность заготовки высотой H с усилием F . В результате формируется рельеф в виде прямоугольной проушины глубиной h_n .



F – усилие прессования; H – высота образца; B – ширина проушины;
 h_n – глубина проушины; h_d – глубина деформированной зоны

Рисунок 2.5 – Схема формирования проушины в результате внедрения пуансона вдоль волокон

Установлено, что стадии процесса деформирования древесины сосны, березы и дуба при внедрении призматического пуансона вдоль волокон в целом подобны. Внедрение пуансона вдоль волокон древесины является процессом местного сжатия и имеет сходство с процессом свободного сжатия вдоль волокон, рассмотренным в п. 2.1.1.1. При внедрении пуансона под его рабочим торцом в древесине создаются напряжения σ , которые можно определить как отношение усилия F , создаваемого прессом, к площади попереч-

ного сечения $B \times S$ (ширина \times толщина) внедряемого пуансона: $\sigma = F / (B \cdot S)$. Возникшие напряжения вызывают появление деформаций ε . Связь между σ и ε можно условно отобразить в виде диаграммы (рисунок 2.6), построенной по результатам анализа диаграмм нагружения, полученных на самопишущем устройстве прессы.

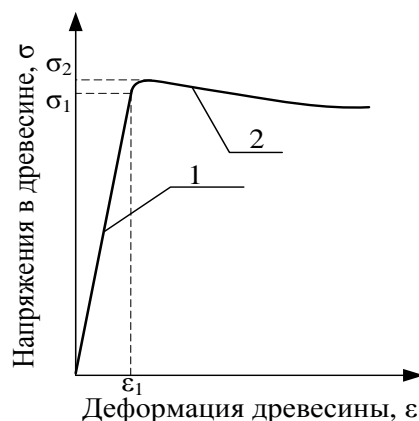


Рисунок 2.6 – Диаграмма местного торцового прессования древесины (взаимосвязь σ и ε для обобщенного материала)

Первой стадии процесса деформирования древесины под проушиной соответствует близкий к прямолинейному участок 1 диаграммы прессования (рисунок 2.3). Этот участок диаграммы соответствует упругой деформации древесины ε_1 и согласуется с аналогичными начальными участками однофазной диаграммы при сжатии древесины вдоль волокон, приведенной в работах [114, 275], диаграммы сжатия вдоль волокон в обойме [114] и диаграммы внедрения пуансона вдоль волокон [114] (см. пп. 1.2.3.1). Величина упругой деформации при этом составляет в среднем до $\varepsilon_1 \leq 8 \%$.

При достижении пикового напряжения σ_2 происходит потеря устойчивости анатомических элементов древесины [239]. Участок древесины под рабочим торцом пуансона скалывается, происходит сдвиг древесины вдоль волокон и начинается процесс пластической деформации – местного смятия древесины вдоль волокон. Этой стадии деформации соответствует участок 2 диаграммы прессования (рисунок 2.3). Средние значения σ_2 при формировании прямоугольной проушины шириной 12 мм в исследованных образцах

составили не более 60 МПа для сосны, 66 МПа для березы, 90 МПа для дуба при $W = 8 \div 18 \%$; при увеличении влажности до 30 % напряжения снижались приблизительно на 50 %.

При скалывании участка древесины под рабочим торцом пуансона в образце начинается формирование поверхностей скольжения, совпадающих с плоскостями боковых граней пуансона и гранями формируемого рельефного отпечатка. Под основанием пуансона в результате местного смятия формируется «пробка» из спрессованной древесины, которая перемещается пуансоном при его движении вдоль плоскостей скольжения в глубь заготовки.

По данным [114], деформация древесины при внедрении пуансона вдоль волокон может составлять 60 % и более. Для исследованных образцов высотой 60 мм величина деформации, рассчитанная по соотношению (1.1), действительно достигала 54 – 66 % (глубина сформированной проушины до 32 – 39 мм) при условии наличия бокового обжима заготовок. Без бокового обжима возможное увеличение глубины получаемых проушин ограничивалось разрушением образцов.

Изменения структуры древесины в результате местного смятия вдоль волокон в настоящее время изучены недостаточно; не установлено влияние деформированной зоны на структуру граничащих недеформированных участков древесины. Указанные вопросы требуют проведения дальнейших исследований и рассмотрены в п. 2.1.2.

2.1.2 Исследование качественных изменений структуры древесины при внедрении призматического пуансона

2.1.2.1 Обоснование изменений структуры древесины в деформированной зоне.

Характер деформирования древесины при внедрении призматического пуансона вдоль волокон определяется жесткостью структурного каркаса древесины. Неоднородность свойств древесины в ранней и поздней зоне вызы-

вает неоднородность напряженного состояния. Пики напряжений находятся в слоях поздней древесины [135, 238, 239]. Неоднородность напряженного состояния возникает также при наличии неровностей на торцах обрабатываемой заготовки [239], соответственно этот риск нужно снижать, предъявляя высокие требования к обработке торцов.

При внедрении пуансона происходит, по выражению Ю.С. Соболева [239], «перекашивание за счет малой сдвиговой жесткости по сравнению с жесткостью на сжатие» (разница в 15 раз). Слои поздней древесины начинают изгибаться. Изгиб слоев может быть односторонним или многосторонним. На односторонний изгиб затрачивается меньше энергии, поэтому он более вероятен при отсутствии ограничивающих такой изгиб связей [101].

Допустим, что сдвигу деформируемых слоев поздней древесины в тангенциальном направлении препятствуют прилегающие к зоне деформации соседние слои прочной поздней древесины. Тогда становится возможен односторонний изгиб годовых слоев в радиальной плоскости за счет сжатия более рыхлой ранней древесины. Степень деформации ранней зоны будет выше, объемная доля ранней древесины уменьшится. Существенна вероятность того, что при сжатии вдоль волокон слои поздней древесины потеряют устойчивость с образованием сдвига в радиальной плоскости. Величину изгиба ограничат сердцевинные лучи.

Нужно учитывать, что разрушение зарождается в окрестности наиболее резко выраженной неоднородности 4 рода [153, 239] (поры, продольные капилляры, нарушения субмикроструктуры). Малая жесткость древесины при сдвиге по сравнению с жесткостью при сжатии вдоль волокон снижает способность древесины к выравниванию пиков напряжений. Необратимые деформации в зоне микроразрушений наблюдаются задолго до общего разрушения образца. Из этого следует, что необратимые деформации в зоне микроразрушений возникают при напряжениях, существенно меньших, чем необходимые для общего разрушения образца [135, 239]. Разрушение в деформируемой зоне продолжается до момента, «пока не будет исчерпана способ-

ность материала локализовать разрушение» [239]. Разрушения в граничных зонах тормозятся за счет всесторонней взаимной поддержки волокон.

Схема предполагаемых изменений структуры древесины представлена на рисунке 2.7. Данная схема разработана С.А. Утробиним под руководством Г.П. Кузнецова в рамках серии работ по изучению процесса формирования декоративных рельефов на поверхности заготовок путем пластического деформирования древесины [120, 122, 124, 278].

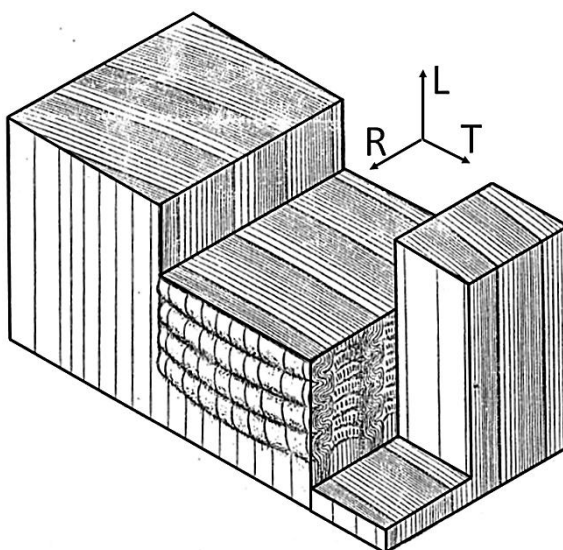


Рисунок 2.7 – Схема предполагаемой структуры древесины деформированной зоны

В тангенциальной плоскости возможное расширение деформированной зоны будет незначительным, поскольку изгиб поздних слоев в этом направлении ограничивается соседними клетками поздней древесины. Предположительно это приведет к некоторому увеличению сил трения, возникающих при перемещении «пробки» из спрессованной древесины в контакте с плоскостями скольжения. Поэтому степень уплотнения древесины, прилегающей к плоскостям скольжения, будет несколько выше, чем в середине деформируемой зоны. Шероховатость торцевой поверхности проушины должна снизиться по сравнению с начальной величиной за счет смятия древесных волокон торцем пуансона. Шероховатость граней проушины может соответствовать шероховатости поверхности древесины при скалывании.

2.1.2.2 Этапы формирования проушины в древесине сосны.

Для проверки сделанных предположений проведена серия экспериментальных исследований деформированной структуры древесины сосны, березы и дуба.

Пуансоны трех размеров сечений 4×25 , 12×25 , 20×25 мм внедряли на различную глубину. Для предотвращения раскалывания заготовок применяли двухсторонний обжим усилием 300 – 2500 Н. На рисунках 2.8 – 2.9 приведены фотографии, отражающие этапы формирования проушин в процессе местного деформирования древесины сосны.

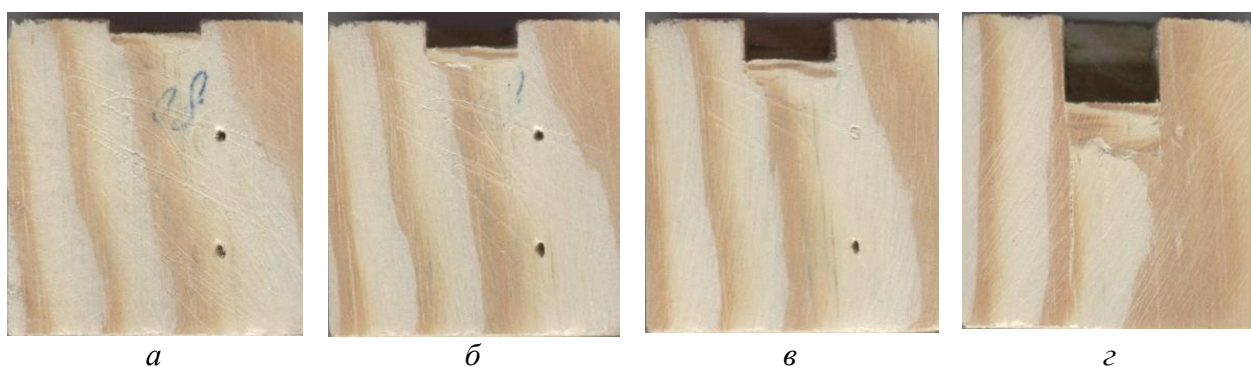


Рисунок 2.8 – Формирование проушины в древесине сосны,
 $W = 8 \%$, $B = 12$ мм, $h_n = 11$ мм: *a* - *г* – этапы процесса



Рисунок 2.9 – Формирование проушины в древесине сосны,
 $W = 8 \%$, $B = 4$ мм, $h_n = 7$ мм: *a* - *в* – этапы процесса

При внедрении пуансона вдоль волокон начался процесс местного сжатия древесины. На начальном этапе процесса (рисунок 2.8 *a*) под рабочим

торцем пуансона возникла упругая деформация древесины, достигающая 8 %. Далее, при достижении пикового напряжения, произошло скалывание площадки древесины под рабочим торцем пуансона и сдвиг вдоль волокон, сопровождающийся местным смятием.

На следующих этапах процесса (рисунок 2.8 б - в), при продвижении пуансона в глубь заготовки, формировались поверхности скольжения, совпадающие с гранями проушины, продолжалось сжатие и перемещение спрессованного слоя древесины вдоль плоскостей скольжения. Высота «пробки» из спрессованной древесины (глубина деформированной зоны h_d) увеличивалась по мере продвижения пуансона в глубь заготовки, несколько расширяясь в тангенциальном направлении. По завершении процесса прессования (рисунок 2.8 г) под основанием пуансона сформировалась «пробка» из спрессованной древесины высотой, соразмерной или меньшей глубины проушины: $h_d \leq h_n$. Это согласуется с ранее полученными данными [338]. Упругое восстановление «пробки» составило не более 2%.

Уплотненная зона несколько расширена в тангенциальной плоскости за счет изгиба поздних слоев, что согласуется с данными, приведенными Куцера [347]. Аналогичные наблюдения приведены в работе [378], где показано, что при сжатии древесины вдоль волокон наблюдается расширение средней зоны деформируемого образца. В рассматриваемом случае расширение в тангенциальном направлении ограничивается соседними клетками прочной поздней древесины. Это приводит к возникновению сил трения в плоскостях скольжения «пробки» из спрессованной древесины. Поэтому в процессе продвижения в глубь древесины усилие, затрачиваемое на трение, постоянно возрастает приблизительно на 10 % в сумме за счет увеличения трения «пробки» о боковые стенки проушины.

Таким образом, при внедрении пуансона происходят три процесса – скалывание, местное смятие, трение граней инструмента о стенки получаемого отверстия. Полученные данные согласуются с результатами, показанными Hesselbach [338].

2.1.2.3 Этапы формирования проушины в древесине березы и дуба.

Этапы формирования проушины в древесине березы и дуба в основном сходны с этапами формирования проушин в древесине сосны. Отличия в процессах обусловлены особенностями структуры древесины березы и дуба. Во-первых, количество и прочность сердцевинных лучей выше, во-вторых, в древесине менее ярко выражены годовичные слои, в-третьих, древесина более плотная. По указанным причинам сопротивление сердцевинных лучей при формировании проушины более значимо, величина изгиба годовичных слоев меньше. Древесина в деформированной зоне более равномерна по структуре, контуры «пробки» и границы между деформированной и недеформированной зоной более четкие (рисунок 2.10 – 2.13).

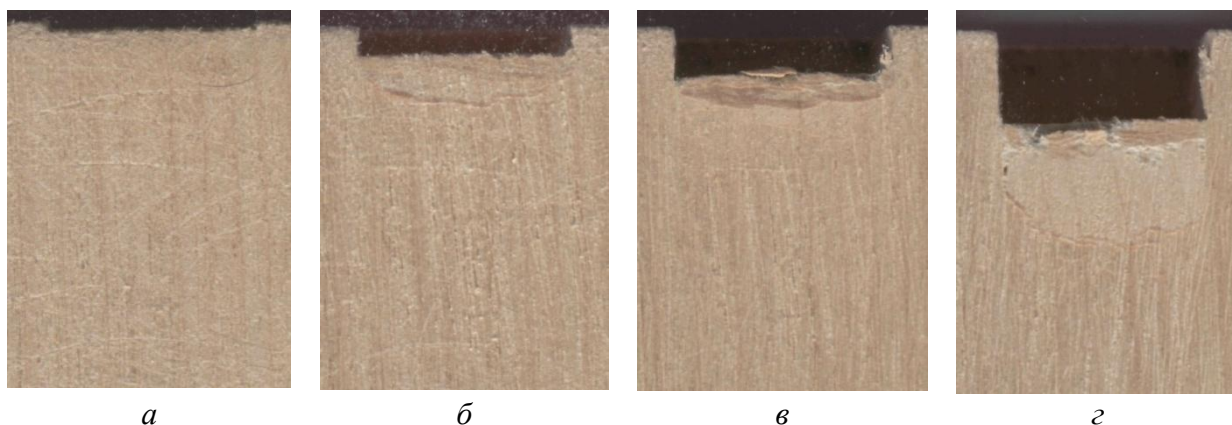


Рисунок 2.10 – Формирование проушины в древесине березы,
 $W = 8 \%$, $B = 12$ мм, $h_n = 6$ мм: *a - г* – этапы процесса



Рисунок 2.11 – Формирование проушины в древесине березы,
 $W = 8 \%$, $B = 4$ мм, $h_n = 7$ мм: *a - в* – этапы процесса

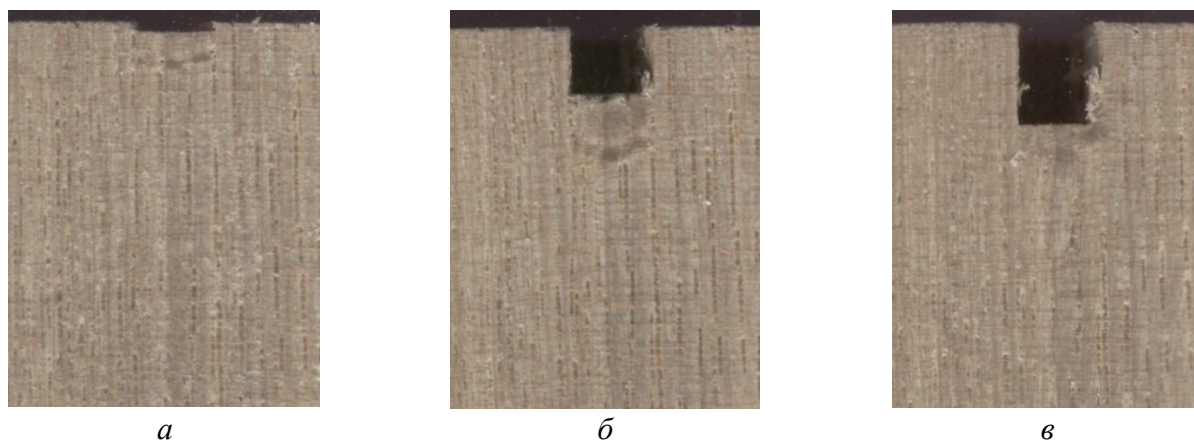


Рисунок 2.12 – Формирование проушины в древесине дуба,
 $W = 8 \%$, $B = 4 \text{ мм}$, $h_n = 7 \text{ мм}$: *a - в* – этапы процесса

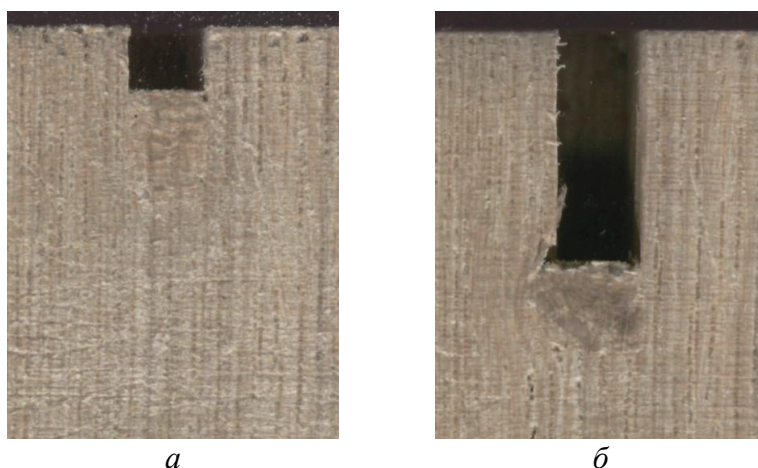


Рисунок 2.13 – Формирование проушины в древесине дуба,
 $W = 8 \%$, $B = 4 \text{ мм}$, $h_n = 12 \text{ мм}$: *a - б* – этапы процесса

2.1.2.4 Структура деформированной зоны.

Для изучения структуры деформированной зоны под проушиной получены тангенциальный и радиальный срезы образцов. Увеличенные изображения зон деформации приведены на рисунках 2.14 и 2.15.

В отличие от свободного сжатия вдоль волокон, когда происходит потеря устойчивости и сдвиг слоев древесины в двух плоскостях (радиальной и тангенциальной, рисунок 2.2), при внедрении пуансона происходит сдвиг в радиальной плоскости. На радиальном разрезе образца наблюдается утолщение зон поздней древесины, на тангенциальном разрезе – складки деформации сдвига поздней зоны в радиальном направлении (рисунки 2.14, 2.15).

Этот результат согласуется с результатами исследований [7, 98-100, 153, 177, 178]. Складки могут быть направлены под некоторым углом к оси образца из-за влияния сердцевинных лучей [7, 98-100, 153, 177, 178, 238, 239].

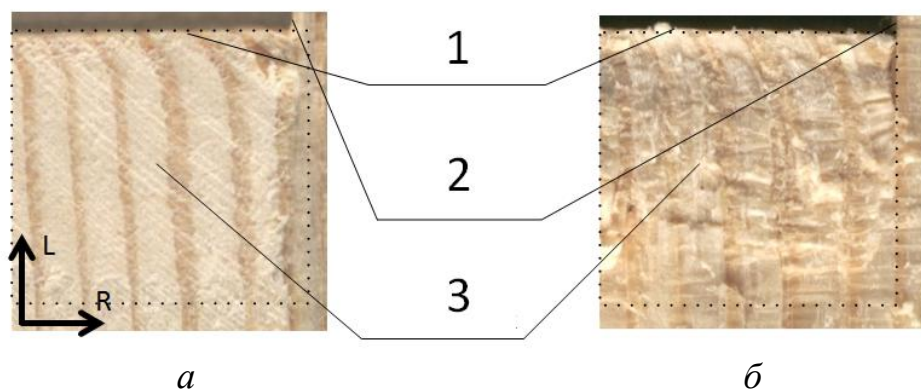


Рисунок 2.14 – Радиальная поверхность деформированной зоны в древесине сосны, $W = 8\%$: *a* – полученная срезом; *б* – полученная скалыванием; 1 – дно проушины; 2 – боковая грань проушины; 3 – участок уплотненной зоны

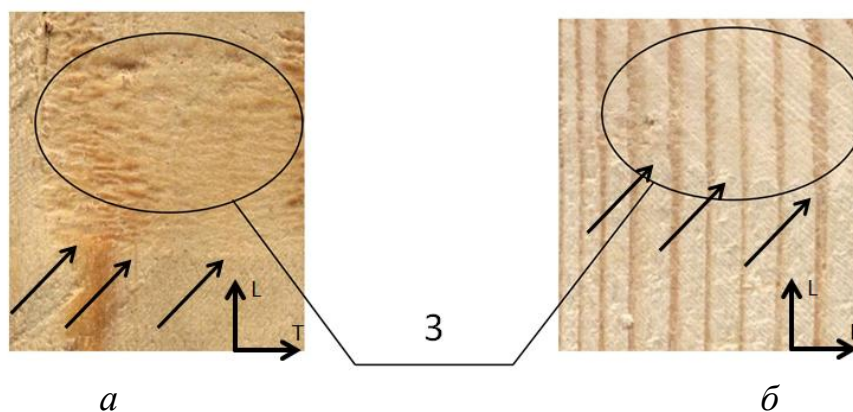


Рисунок 2.15 – Макроструктура деформированной зоны в древесине сосны, $W = 8\%$: *a* – тангенциальный разрез; *б* – радиальный разрез; 3 – участок деформированной зоны; стрелками отмечены нижние границы уплотненной зоны

На рисунке 2.15 видно, что объемная доля ранней древесины уменьшается, и, следовательно, степень уплотнения ранней зоны будет несколько выше, чем поздней. Полученные данные согласуются с результатами, показанными Куцера [347].

На рисунках 2.14, 2.15 наблюдается хорошо различимая граница между спрессованным участком и недеформированной древесиной (стрелками отмечены нижние границы уплотненной зоны). Прослеживается, что соседние с «пробкой» участки недеформированной древесины сохраняют свою исходную структуру. Этот результат согласуется с данными, полученными многими исследователями [98-100, 177, 178, 238, 239, 268, 289-291, 301], которые показали, что изменение микроскопического строения древесины при сжатии вдоль волокон происходит только в зоне разрушения, что в частности связано со стесненностью деформаций благодаря наличию сил трения и механизмом компенсации микронеоднородностей в локальных зонах материала.

Более детально структура и размеры складок древесных волокон в уплотненной зоне изучены по микрофотографиям поверхностей среза в тангенциальной плоскости (рисунок 2.16) и поверхностей скалывания в радиальной плоскости (рисунок 2.17). Светлыми стрелками на рисунках отмечены линии, по которым проходят складки древесных волокон. На тангенциальном срезе (рисунок 2.16) это линии перерезания складок.

Структурные элементы древесины в исследуемых образцах имеют следующие размеры. Радиальный размер ранних трахеид 35 – 50 мкм, поздних 10 – 20 мкм; их длина достигает 2 мм. На радиальных стенках ранних трахеид имеются крупные окаймленные поры размером 14 – 17 мкм с круглыми отверстиями диаметром 5 – 7 мкм. Встречаются фрагменты сердцевинных лучей шириной 113 – 178 мкм из 5 – 10 рядов паренхимных клеток.

Размеры складок различаются в слоях ранней и поздней древесины. В слоях ранней древесины исследуемого деформированного участка имеются неравномерные мелкие и крупные складки высотой от 67 до 333 мкм, шириной от 138 до 650 мкм (рисунок 2.16). Складки в поздней зоне более равномерны. Их высота составляет от 277 до 500 мкм, ширина от 290 до 330 мкм. Структурные элементы древесины, расположенные вне зон уплотнения, сохраняют свою первоначальную структуру.

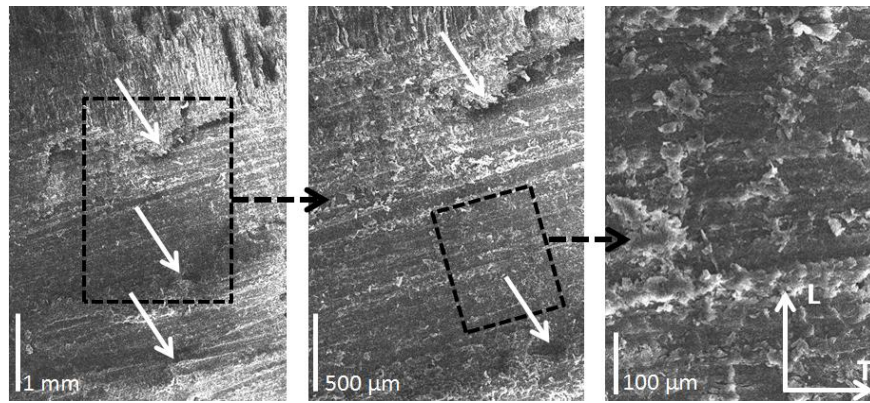


Рисунок 2.15 – Микрофотографии деформированной зоны древесины сосны, тангенциальный срез

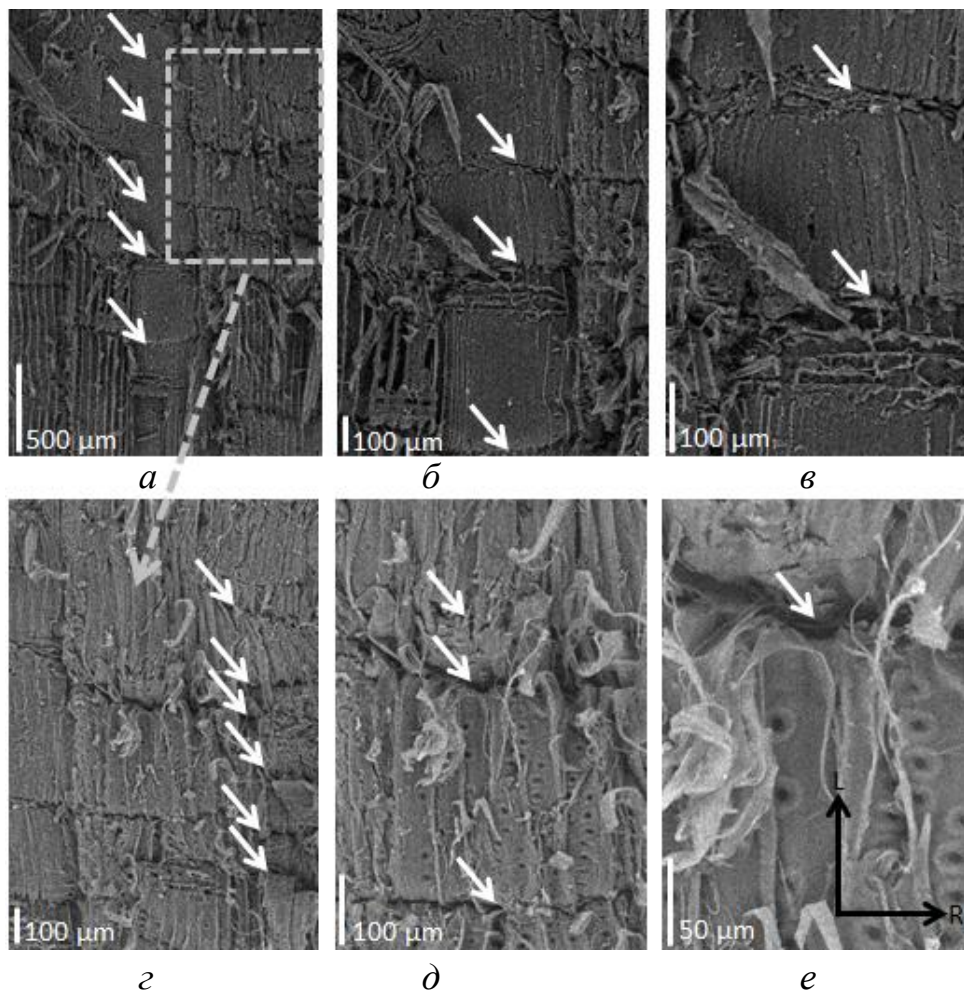


Рисунок 2.16 – Микрофотографии складок в деформированной зоне древесины сосны, радиальная поверхность скалывания: *а* – деформированная зона; *б, в* – поздняя древесина; *г - е* – ранняя древесина

Таким образом, «пробку» из спрессованной древесины можно рассматривать как более плотное включение в структуру по типу сучка, незначительно влияющее на структуру, и, следовательно, общие свойства основного объема древесины. Аналогичные исследования, проведенные для древесины березы и дуба, подтверждают сделанные выводы.

2.1.2.5 Точность формирования проушин.

Изучая по макро- и микрофотографиям (рисунки 2.17, 2.18) форму поверхности дна и стенок проушины, можно отметить четкость контуров, высокую точность размеров, отсутствие значительных задигов волокон, малую шероховатость. Форма и размеры отпечатка в высокой степени соответствуют форме и размерам рабочей части пуансона. Отклонения формы на исследованных образцах составили не более + 0,142 мм.



Рисунок 2.17 – Форма поверхности стенок и дна проушины (сосна, $W = 8\%$)

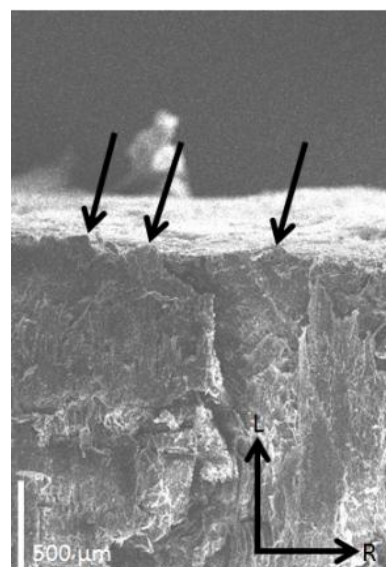


Рисунок 2.18 – Микрофотография торцевой поверхности проушины

Поверхность дна проушины (торцевой поверхности рельефа) уплотнена, имеет низкую шероховатость с высотой наибольших неровностей в пределах 43 – 86 мкм (рисунок 2.17). Поры закрыты за счет наклона и сплющи-

вания поверхностных волокон. Закрытие пор потенциально уменьшает вероятность высокой впитываемости клея, являющейся одной из проблем склеивания торцовыми поверхностями [326]. Изученные показатели имеют значение для разработки режимов склеивания на прессованные шипы.

2.1.3 Определение граничных условий формирования качественных проушин

Проведена серия исследований по определению условий формирования проушин высокого качества. В образцах из древесины сосны, березы, дуба влажностью от 5 до 30 % формировали проушины шириной 4, 12 и 20 мм глубиной до 30 мм путем внедрения пуансонов вдоль волокон. При нарушении ряда условий существенно снижается точность размеров и формы проушины, возрастает риск возникновения ряда дефектов: задиров волокон, выпуклости дна проушины, микротрещин и трещин.

2.1.3.1 Влияние влажности.

Существенным фактором возникновения дефектов является повышенная влажность древесины. Сравнение качества рельефных отпечатков в виде проушин, полученных во влажных ($W = 30\%$) и сухих ($W = 9\%$) заготовках показало, что при увеличении влажности качество проушин значительно снижается. Рельефный отпечаток, полученный во влажной древесине, имеет ряд дефектов:

- разрывы и задиры волокон на боковых поверхностях (рисунок 2.19);
- выпуклую форму дна проушины вследствие упругого восстановления после снятия нагрузки (рисунок 2.20);
- микротрещины (рисунок 2.19), вызванные перемещением значительного количества влаги по капиллярам древесины [196, 289, 292-294].

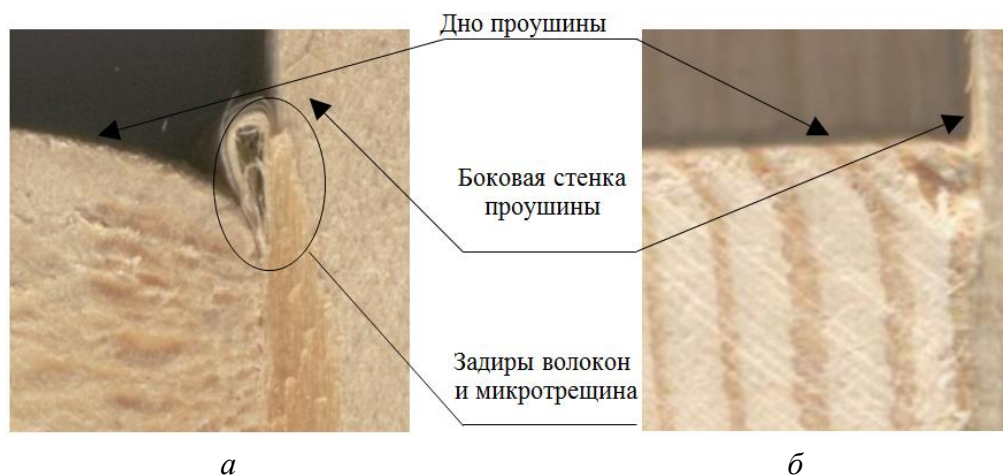


Рисунок 2.19 – Внешний вид проушин, полученных в древесине сосны с разной влажностью: *a* – $W = 30\%$; *б* – $W = 9\%$

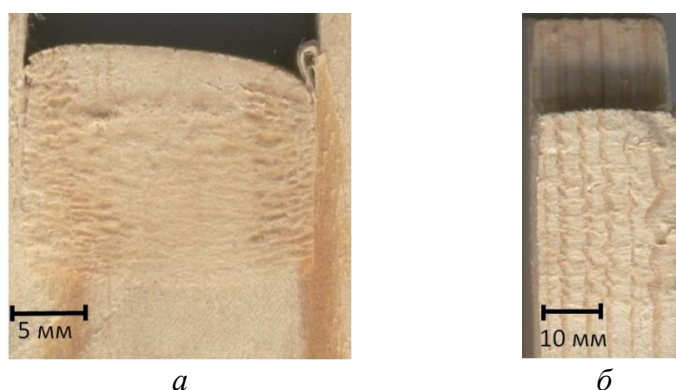


Рисунок 2.20 – Дефект проушин в виде выпуклости дна (сосна, $W = 30\%$, $B = 20$ мм): *a* – вид спереди; *б* – боковой разрез

2.1.3.2 Влияние наклона волокон.

Другим фактором, снижающим качество рельефных отпечатков, является наличие существенного наклона волокон в заготовке. В момент внедрения пуансона в заготовку происходит сдвиг древесины вдоль волокон; при значительном наклоне волокон плоскость скольжения боковых граней пуансона и плоскость формирующихся при скалывании боковых граней проушины не совпадают (рисунок 2.21 *a*). Это приводит к появлению задиры волокон на боковой грани проушины со стороны наклона волокон под положительным углом относительно боковой грани пуансона и появлению неровностей поверхности скалывания на противоположной грани (рисунок 2.21 *б*).

При отсутствии обжима заготовки и (или) увеличении глубины внедрения пуансона возникает опережающая трещина, что в конечном итоге может привести к раскалыванию заготовки (рисунки 2.21 в-д; 2.22). Одной из причин появления трещин являются касательные напряжения, возникающие при несовпадении угла приложения нагрузки и направления волокон в древесине.

Экспериментально установлена критическая величина наклона волокон: 15 % для образцов из древесины сосны и 10 % для образцов из древесины березы и дуба.

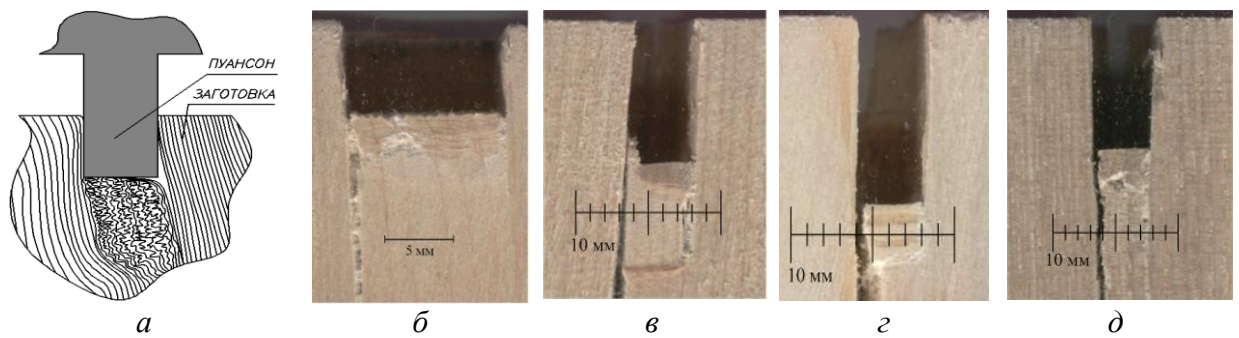


Рисунок 2.21 – Трещины в образцах с наклоном волокон: а – схема возникновения; б, в – береза, $W = 8 \%$; г – сосна, $W = 8 \%$; д – дуб, $W = 18 \%$

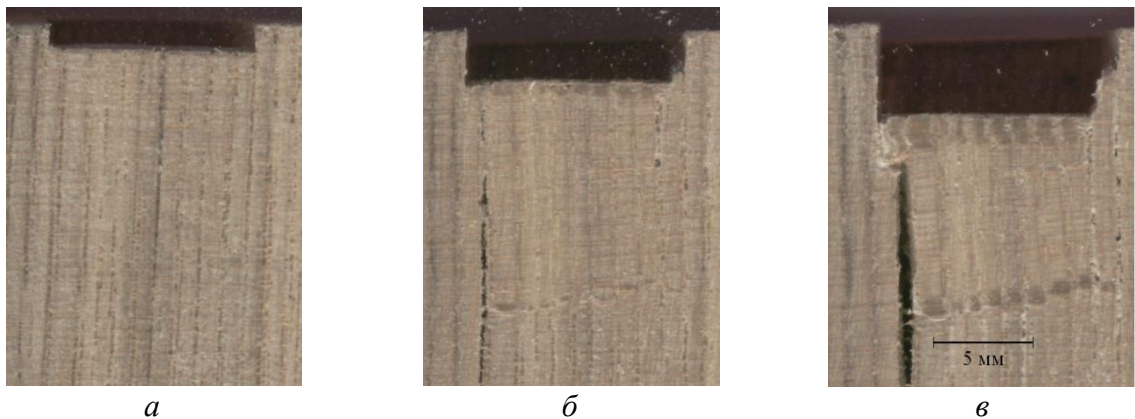


Рисунок 2.22 – Образование трещины в образце из древесины дуба, $W = 8 \%$, $B = 12 \text{ мм}$: а, б, в, г – стадии процесса

2.1.3.3 Влияние обжима заготовки.

Как указано выше, для предотвращения появления трещин заготовку необходимо предварительно обжимать в плоскостях, параллельных боковым

граням проушин. Отсутствие обжима увеличивает риск возникновения крупных трещин по плоскостям скольжения, а также может вызвать боковое смещение спрессованной «пробки». Величина усилия обжима для исследуемого диапазон значений установлена опытным путем и составляет от 300 до 1 кН для образцов из древесины сосны, от 400 до 1,2 кН для березы и дуба в зависимости от ширины формируемых проушин. Обжим заготовки по ширине снижает вероятность возникновения трещин в дне проушины и позволяет увеличить глубину внедрения пуансона.

2.1.3.4 Влияние глубины внедрения пуансона.

Перспективы применения способа торцового прессования для формирования проушин зависят от ограничений по глубине получаемого рельефа. Серия экспериментов показала, что при высоте образца, значительно превышающей глубину получаемого рельефа, формирование качественного отпечатка продолжается до момента возникновения опережающей трещины в плоскости скольжения и последующего разрушения исследуемого образца. При этом глубина получаемого рельефа зависит от условий прессования и состояния древесины (наличия обжима, влажности древесины, наличия наклона волокон).

Проведенные экспериментальные исследования позволили установить граничные значения глубины внедрения пуансона. Для проушин малой ширины ($B = 4$ мм), наиболее интересных с точки зрения перспектив изготовления соединений с многократными проушинами и шипами, глубина внедрения пуансона (глубина проушины h_n) не должна превышать полутора ширин проушины B ($h_n \leq 1,5 B$) при отсутствии обжима и две с половиной ширины ($h_n > 2,5 B$) при наличии двухстороннего обжима. Для проушин бóльших ширин ориентировочные граничные значения глубин составили соответственно $h_n \leq 0,6 B$ и $h_n \leq 1,1 B$. При этом по предварительной оценке глубина деформированной зоны h_3 не превышает двух глубин проушин h_n : $h_3 \approx (0,4 - 1,8) h_n$.

При увеличении глубины внедрения свыше указанных пределов возникает опережающая трещина в плоскости скольжения боковых граней пуансона и происходит раскалывание образца. Окончательная глубина трещины формируется при упругом восстановлении спрессованного объема древесины, которое составляет в среднем от 1 до 6 % для исследованных пород. В итоге трещина проходит по всей высоте деформированного участка, и ее длина равна глубине деформированной зоны. Наличие значительного наклона волокон увеличивает вероятность возникновения трещин.

2.1.3.4 Условия формирования качественных проушин.

Проушины наиболее высокого качества (рисунок 2.23) получены в сухой древесине влажностью от 5 до 18 %, с наклоном волокон не более 15 % для образцов из древесины сосны и не более 10 % для образцов из древесины березы и дуба. Узкие проушины глубиной до полуторной ширины ($h_n \leq 1,5 B$) получены без бокового обжима заготовок. При увеличении глубины внедрения пуансона до двух с половиной и более ширины проушины ($h_n > 2,5 B$) необходимым условием достижения высокого качества проушин явилось наличие бокового обжима заготовок в процессе прессования с усилием от 300 до 1 кН для образцов из древесины сосны, от 400 до 1,2 кН для образцов из древесины березы и дуба. При нарушении указанных условий существенно возрастал риск возникновения дефектов.

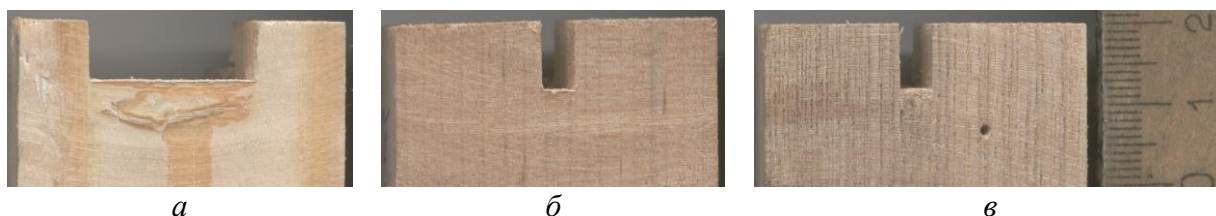


Рисунок 2.23 – Примеры качественных проушин: *а* – в древесине сосны, $B = 20$ мм, $h_n = 8$ мм; *б* – в древесине березы, $B = 4$ мм, $h_n = 8$ мм; *в* – в древесине дуба, $B = 4$ мм, $h_n = 8$ мм (масштаб рисунка (*в*) действителен для остальных рисунков)

2.2 Теоретическое обоснование закономерностей процесса формообразования элементов шиповых соединений способом торцового прессования

2.2.1 Обоснование выбора расчетной схемы

2.2.1.1 Модели древесины.

Для описания поведения древесины в нагруженном состоянии в ходе технологических процессов обработки используются различные подходы [98-100, 275, 292-294, 343]. Распространен прием замены реального материала его реологической моделью: упругой, упруго-вязкой, упруго-эластической или др. Степень точности и сложность модели для каждого конкретного случая должна быть оправдана поставленными целями [198, 269].

Связь между напряжениями и деформациями в пределах зоны упругой деформации описывается соотношениями, разработанными на основе теории упругости анизотропного тела [7, 197, 198, 239-240, 275]. В качестве упругой модели используется тело Гука. В основном это применимо для задач расчета инженерных сооружений при кратковременных нагрузках.

Продолжительное приложение нагрузок, вызывающее появление упругих, эластических, пластических деформаций описывается на основе реологических моделей, представляющих собой различные комбинации упругих, вязких и других элементов, состоящих из сочетаний простых моделей: упругого тела Гука, вязкого тела Ньютона, пластического тела Сен-Венана [177, 178, 195, 197, 198, 275]. Такие модели используют для описания процессов сушки, резания, прессования и др. [99, 153, 101, 275, 273].

Примеры реологических моделей приведены на рисунке 2.24. Упруго-вязкая модель, предложенная Ю.М. Ивановым [98-100] для описания процесса прессования, приведена на рисунке 2.24 в. Модель, отражающая поведение тела, деформации которого обратимы [275], включающая последовательно соединенные модели упругого тела Гука и эластического тела Кельвина,

приведена на рисунке 2,24 б. Модели древесины как упруго-пластично-эластического тела, включающие модели гидроцилиндров с клапанами (рисунок 2.24 д) или пластические тела Сен-Венана (рисунок 2.24 е), предложены в работах [130, 269-272]. Еще более сложна модель по Nassani [337], включающая упругое, пластическое, гидрорасширительное, упруго-пластическое, механо-сорбционное тела, приведена на рисунке 2.24 ж.

Разнообразие предлагаемых исследователями моделей приводит к разнообразию применяемых в деревообработке методов расчета и математических моделей, описывающих поведение древесины под нагрузкой.

2.2.1.2 Методы расчета и расчетные модели.

Многообразие моделей древесины и методов инженерных расчетов, и, соответственно, математических моделей, описывающих напряженно-деформированное состояние древесины, обусловлены сложностью и неоднородностью структуры древесины, анизотропией ее свойств. Известны реологические модели, учитывающие различным образом упругие, вязкие и пластичные свойства древесных материалов [11, 16, 23, 24, 26, 30, 86-90, 98-101, 136, 153, 154, 177, 178, 182, 195, 197, 198, 337, 240, 269-275].

Использование таких уравнений для моделирования процесса прессования ограничено, в частности, из-за непрерывного и существенного изменения древесной структуры [86-90]. Сложное неоднородное напряженно-деформированное состояние древесины в процессе прессования требует описания более сложными моделями, чем при одноосном механическом нагружении малой интенсивности в стационарных температурно-влажностных условиях, при стабильном состоянии структурного каркаса [86-90].

В общем виде реологические дифференциальные уравнения реальных сплошных сред содержат совокупность показателей напряжения, деформаций и их производных, а также вязкости и модулей упругости. Идеальные реологические модели, построенные на основе комбинаций типовых элемен-

тов (рисунок 2.24), предполагают наличие определенных допущений при разработке математических моделей.

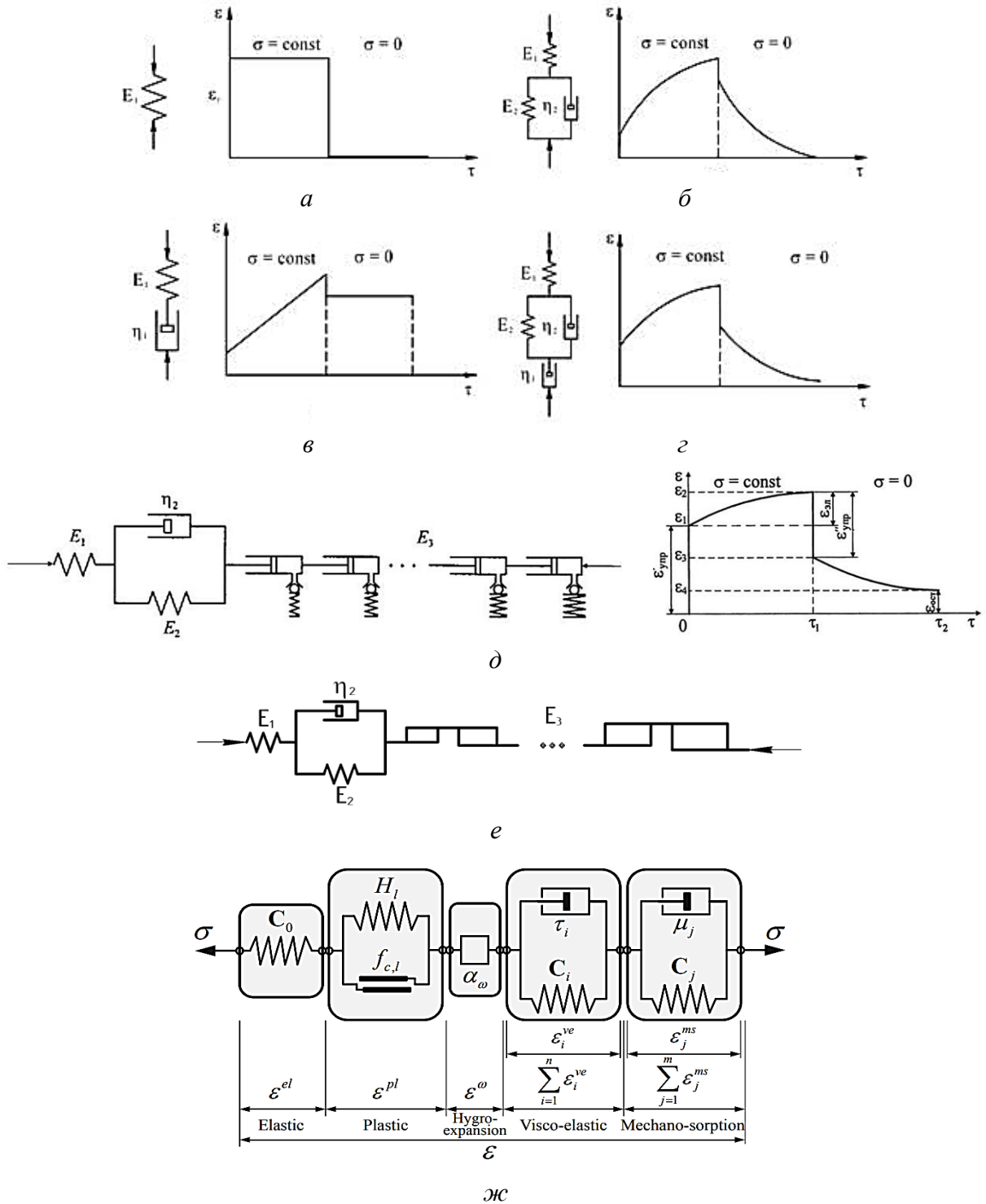


Рисунок 2.24 – Варианты реологических моделей древесины: *а* – упругая; *б* – упруго-эластическая; *в* – упруго-вязкая; *г* – упруго-вязко-эластическая; *д, е* – упруго-пластично-эластическая [270]; *ж* – комбинированная модель по Nassani [337]

По отзывам исследователей [182], даже наиболее сложные и достаточно точно отражающие поведение древесины модели имеют ограниченное применение, поскольку основаны на ряде допущений, связанных с применением экспериментальных данных.

Вместе с тем, изучение частных и обобщенных моделей позволяет провести анализ влияющих факторов для описания процесса местного прессования. Рассмотрим несколько подходов к описанию поведения древесины под нагрузкой.

В работе Б.Н. Уголева [275] общая деформация ε в любой фазе сжатия (рисунки 1.6, 1.7) описывается как сумма упругой ε_y и пластической ε_n [275, 293]:

$$\varepsilon = \varepsilon_y + \varepsilon_n, \quad (2.1)$$

или

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E} + \frac{1}{2\eta} \cdot \frac{\sigma^2}{v}, \quad (2.2)$$

где E – модуль упругости древесины;

η – коэффициент вязкости древесины;

v – скорость нагружения.

Здесь можно отметить, что степень прессования увеличивается с увеличением напряжений и уменьшается с увеличением модуля упругости, вязкости и скорости нагружения. Величина упругой деформации для первой и третьей фаз (рисунки 1.6, 1.7) определяется первым слагаемым, а величина пластической – вторым слагаемым. Во второй фазе доля пластической деформации в общей деформации значительно увеличивается за счет смятия тонкостенных элементов древесины.

Малым объемам древесины, в которых пренебрегают шириной годичных слоев, можно приписать схему ортогональной анизотропии [275]. Обобщенный закон Гука для главных направлений ортотропного тела имеет следующий вид:

$$\begin{aligned}
 \varepsilon_a &= \frac{1}{E_a} (\sigma_a - \mu_{ra} \sigma_r - \mu_{ta} \sigma_t); & \gamma_{rt} &= \frac{\tau_{rt}}{G_{rt}}, \\
 \varepsilon_t &= \frac{1}{E_t} (\sigma_t - \mu_{rt} \sigma_r - \mu_{at} \sigma_a); & \gamma_{ar} &= \frac{\tau_{ar}}{G_{ar}}, \\
 \varepsilon_r &= \frac{1}{E_r} (\sigma_r - \mu_{tr} \sigma_t - \mu_{ar} \sigma_a); & \gamma_{ta} &= \frac{\tau_{ta}}{G_{ta}},
 \end{aligned} \quad (2.3)$$

где $\varepsilon_a, \varepsilon_r, \varepsilon_t$ – относительная деформация соответственно вдоль волокон, в радиальном и в тангенциальном направлениях;

$\sigma_a, \sigma_r, \sigma_t$ – нормальные напряжения соответственно в продольном, радиальном, тангенциальном направлениях;

$\mu_{ra}, \mu_{ar}, \mu_{ta}, \mu_{at}, \mu_{rt}, \mu_{tr}$ – коэффициенты поперечной деформации (коэффициенты Пуассона);

γ – относительный сдвиг;

$\tau_{rt}, \tau_{ar}, \tau_{ta}$ – касательные напряжения;

G_{rt}, G_{ar}, G_{ta} – модуль сдвига.

Тогда величина деформации зависит от ряда факторов:

$$\varepsilon = f(\sigma, \tau, E, \mu, G, \eta, \nu). \quad (2.4)$$

Известно, что механические характеристики связаны с породой и состоянием древесины [275], напряжения – с глубиной внедрения пуансона [86-90, 114]. Тогда основными влияющими факторами для определенной породы будут глубина получаемой проушины, температура и влажность древесины, скорость прессования:

$$\varepsilon = f(h_n, t, W, \nu). \quad (2.5)$$

Для сравнения, Е.М. Тюленева в работе [269] предлагает следующее соотношение для определения суммарной деформации от нагрузки:

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_1} + \frac{\sigma}{E_3} + \frac{\sigma}{E_2} \left(1 - e^{-\frac{E_2}{\eta_2} \tau} \right), \quad (2.6)$$

где E_1 – мгновенный модуль упругости;

E_3 – коэффициент пропорциональности («модуль пластической деформации»);

E_2 – модуль упругости второго рода;

e – основание натурального логарифма;

η – коэффициент эластичности;

τ – время нахождения образца под нагрузкой.

Несмотря на отличия в описании процесса, перечень исходных влияющих факторов будет совпадать с приведенным выше (выражение (2.5)).

Несколько иной подход, позволяющий проанализировать распределение напряжений в образце, показан в работе Ю.С. Соболева [239]. Приведено решение задачи напряженно-деформированного состояния для ортотропной призмы при ее сжатии вдоль волокон в первом и втором приближениях. Уравнение равновесия для образца в форме призмы составлено в виде системы дифференциальных уравнений:

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial \sigma_x}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial z} &= 0; \\ \frac{\partial \tau_{xy}}{\partial x} + \frac{\partial \sigma_y}{\partial y} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial z} &= 0; \\ \frac{\partial \tau_{xz}}{\partial x} + \frac{\partial \tau_{yz}}{\partial y} + \frac{\partial \sigma_z}{\partial z} &= 0. \end{aligned} \right\} (2.7)$$

Далее обобщенный закон Гука выражен через постоянные упругости, компоненты деформаций выражены через компоненты перемещений и проведено решение уравнений равновесия (2.5) при помощи функций Максвелла [282], что позволило получить соотношения для компонентов общего тензора напряжений. На этом основании получены компоненты напряженного состояния для заданной формы и сечения образца, а также определенного соотношения постоянных упругости. На рисунке 2.25 представлены результаты вычислений напряжений σ_z в различных точках торцевого и срединного сечений.

Сделаны выводы [239], что основные напряжения σ_z имеют значения выше средних по периферии торцевого сечения. Наибольшие касательные напряжения τ_{yz} и τ_{xz} действуют в торцевых сечениях образца, поэтому в про-

цессе анализа процесса сжатия следует учитывать касательные напряжения, возникающие в торцевых сечениях.

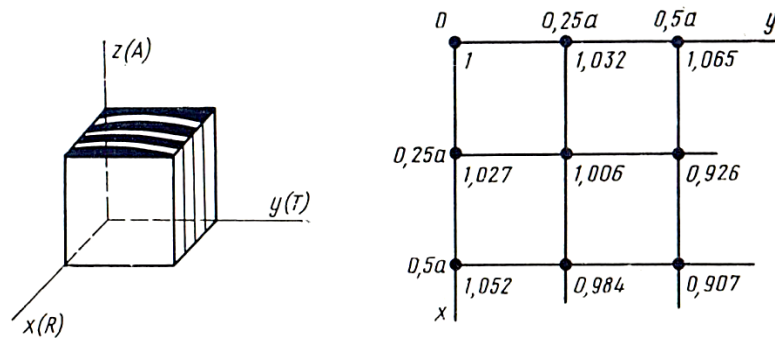


Рисунок 2.25 – Результаты вычисления напряжений σ_z для ортотропного куба из древесины сосны при сжатии вдоль волокон, a – размер стороны поперечного сечения [239]

Напряжения σ_x и σ_y достигают максимальных значений (до 1,5 % среднего значения σ_z) в срединном сечении образца, что соизмеримо с их предельными значениями и ведет к разрушению образцов. Полученные заключения представляют интерес для подготовки описания процесса местного сжатия древесины вдоль волокон, т.е. прессования проушин. В частности, нужно иметь в виду необходимость обжима заготовки по сечению, вытекающую из особенностей распределения напряжений по сечению.

В работах О.Р. Дорняк [86-90] предложены модели для описания механического поведения ненасыщенных анизотропных коллоидных капиллярно-пористых материалов применительно к древесине, для прогнозирования параметров структуры и прочности при уплотнении волокнистого коллоидного капиллярно-пористого материала. Получены реологические коэффициенты для расчетов напряженно-деформированного состояния древесины отдельных пород. Показано отличие реологических параметров более чем на порядок в направлениях, параллельных и перпендикулярных волокнам. Разработана методика определения распределений полей влажности, температуры, пористости, плотности в поперечном сечении образца на основе численных методов. Работа с характеристиками микронапряжений, деформаций приво-

дит к выводам, согласующимся с результатами других исследователей: в числе основных параметров процесса прессования находятся влажность, температура, механические характеристики древесины, размеры сечения образцов.

Таким образом, анализируя модели, представленные в рассмотренных выше работах и ряде других [11, 16, 23, 24, 26, 30, 85, 86, 98-101, 136, 153, 154, 177, 178, 182, 197, 198, 239, 269-272, 300], можно сделать выводы о разнообразии их представлений, использовании для различных целей различающихся подходов с разной степенью точности описания процессов. Вместе с тем, можно сделать обобщающее заключение о согласии по ряду влияющих на процесс нагружения древесины факторов и условий прессования образцов.

2.2.1.3 Особенности теоретического решения задач при экспериментальном определении характеристик древесины.

Используя в теоретических выкладках справочные значения механических характеристик древесины, определенные экспериментально, необходимо понимать, что условиями соответствия характеристик изучаемых образцов древесины справочным значениям являются не только те же условия произрастания, зона ствола для изготовления заготовок и ряд подобных факторов, но также и геометрическое, статическое, кинетическое, температурно-влажностное и структурное подобие условий экспериментов [239]. Выполнение всех этих условий на практике невозможно, в связи с чем наблюдается значительная изменчивость механических характеристик древесины.

В частности, при применении методов механики твердого деформируемого тела, реологии, механики многофазных систем, необходим учет не только различий свойств древесины в трех взаимно перпендикулярных направлениях, но и соотношений между размерами исследуемых образцов и структурных элементов древесины, т.е. учет масштабного эффекта [3, 28, 238-240]. В работах [143, 144, 238, 239] убедительно показано, что масштабный фактор оказывает влияние на упругие, прочностные, жесткостные харак-

теристики древесины. Он связан с неоднородностью напряженного состояния в микрообъемах древесины, стохастическим характером распределения неоднородностей структуры [10, 15], наличием напряжений, возникающих за счет анизотропии усушки и других факторов, связанных с «предысторией образцов» [34, 239].

Коэффициенты вариации свойств древесины, приведенные в стандартах [46], имеют ориентировочные значения. Тогда для точного математического описания процесса необходимы исследования свойств древесины образцов при условиях, как можно более точно соответствующих заданным для изучаемого процесса, иначе ценность строгих методов расчета снижается за счет использования весьма приближенных значений характеристик древесины, полученных опытным путем при несоответствии условий подобия. Использование опытных постоянных дает погрешности более высокого порядка, чем сами расчеты [239]. Для получения максимально точных результатов расчетов необходим значительный объем предварительных работ по установлению значений характеристик, что не всегда оправдано целями и задачами разработки математического описания процесса.

В нашем случае в задачи теоретического обоснования, проводимого с рядом допущений, входит установление наиболее значимых факторов процесса прессования, что является достаточным для дальнейшего экспериментального определения режимов процесса. В этой связи достаточным является использование известных справочных значений характеристик.

2.2.1.4 Обоснование расчетной схемы.

Для большинства деталей при решении задач механики твердого деформируемого тела наиболее приемлема схема анизотропии ортотропного тела. Выбор расчетной модели анизотропии зависит от соотношения между размерами структурных элементов и их изделий.

Для сравнительно крупных образцов с соотношением размера поперечного сечения a к радиусу кривизны среднего годового слоя r_{cp} , близким к 1,

применима схема трансверсально-изотропного тела. Для таких образцов изменчивостью характеристик с радиальным и тангенциальном направлении допустимо пренебречь [239].

Для малых образцов с площадью поперечного сечения от 1 до 20 см² положение главных осей R и T вполне определено. К таким объемам применима модель ортотропного тела. Наиболее характерным ортотропным объемом древесины является $V = 10 \text{ см}^3$ [239]: в этом объеме находится достаточное число структурных элементов, позволяющих считать древесину сплошным и квазиоднородным телом и применять усредненные механические характеристики. Это допущение позволяет применять уравнения сплошных деформируемых сред.

В работе Ю.С. Соболева [239] показано, что при высоте образца, превышающей размеры сечения втрое, неравномерность нормальных напряжений σ_z в срединном сечении мала (см. схему на рисунка 2.25), нормальные напряжения σ_x и σ_y равны нулю, как и касательные напряжения. Напряженное состояние можно считать однородным и линейным.

Таким образом, при разработке модели, описывающей процесс формирования проушин, в качестве базовой схемы можно отталкиваться от схемы ортотропной призмы, подвергнутой состоянию простого сжатия.

2.2.2 Теоретическое обоснование механизма формирования прямоугольной проушины в процессе местного торцового прессования

Основным показателем, позволяющим оценить энергосиловые затраты процесса, является усилие прессования. Для разработки расчетной схемы для моделирования процесса (рисунок 2.26) приняты следующие условности и допущения:

- пласьть заготовки ориентирована тангенциально;
- обрабатываемая заготовка располагается в матрице, предотвращающей боковую деформацию;

- скалывание слоя древесины высотой h_0 происходит в начальный момент времени;
- пунсоном сжимается слой древесины высотой $h_0 = h_n + h_d$;
- боковое уширение в направлении оси y пренебрежимо мало;
- собственный вес древесины не учитывается;
- процесс нагружения является статическим, работа внешних сил полностью преобразуется в энергию пластической деформации;
- значения напряжений σ_i определяются как средние значения для единицы площади сечения, занятой как сечениями структурных элементов, так и полостями [293, 294].

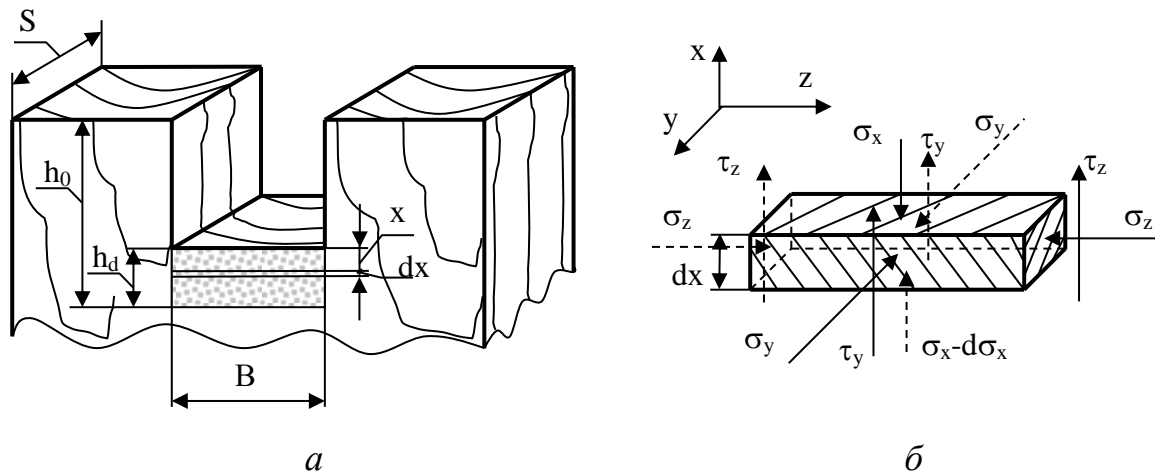


Рисунок 2.26 – Расчетная схема для моделирования процесса прессования:
a – расположение деформированного участка древесины под проушиной;
б – элементарный слой древесины в спрессованном состоянии

В расчетной схеме приняты следующие обозначения:

- h_0 – начальная высота прессуемого слоя древесины под проушиной, мм;
- h_n – глубина проушины, мм;
- h_d – высота спрессованного слоя древесины, мм;
- B – ширина проушины, мм;
- S – толщина заготовки, мм;

- x – расстояние от передающей давление поверхности до элементарного слоя, мм;
- dx – толщина элементарного слоя, мм;
- σ – напряжение непосредственно под передающей давлением поверхностью, МПа;
- σ_x – напряжение в древесине на глубине x , МПа;
- τ_{ck} – предел прочности при скалывании вдоль волокон, МПа;
- σ_y, σ_z – напряжения в древесине от бокового давления на стенки матрицы и граничные слои древесины в направлении осей y, z , МПа;
- τ_y, τ_z – напряжения от трения о поверхности стенок матрицы и граничные слои древесины в направлении осей y, z , МПа;
- μ_{ra}, μ_{ta} – коэффициенты Пуассона;
- f_m, f_{dr} – коэффициенты трения металл-древесина и древесина-древесина.

Усилие прессования проушины F складывается из усилия F_{cv} , необходимого для свободного прессования слоя древесины под проушиной, усилия скалывания F_{ck} площадки под дном проушины, силы трения древесины T_m о стенки матрицы и силы трения T_{dr} слоя под проушиной о граничные слои древесины:

$$F = F_{cv} + F_{ck} + T_m + T_{dr} . \quad (2.8)$$

Усилие F_{cv} , Н, определим по формуле:

$$F_{cv} = SB\sigma_x . \quad (2.9)$$

Усилие F_{ck} , Н, определим по соотношению:

$$F_{ck} = \tau_{ck} S \int_0^{h_n} dx = Sh_n \tau_{ck} . \quad (2.10)$$

Суммарную силу трения древесины T_m о стенки матрицы выразим в следующем виде:

$$T_m = 2B \int_0^{h_n} \tau_y dx . \quad (2.11)$$

Сила трения T_{dr} объема древесины под проушиной о стенки шипов:

$$T_{dr} = 2S \int_0^{h_n} \tau_z dx. \quad (2.12)$$

Для определения сил трения выделим у спрессованного объема древесины на расстоянии x от дна проушины, т.е. от передающей давление поверхности, элементарный слой древесины толщиной dx (рисунок 2.26 б). На элементарный слой действуют следующие силы: прессования; бокового давления со стороны стенок пресс-формы и граничных слоев древесины; трения древесины о боковые стенки пресс-формы и боковые стенки шипов.

Сила сопротивления трению о поверхности стенок пресс-формы зависит от нормального давления, в данном случае от σ_y , и от коэффициента трения дерева о металл f_m ; напряжение τ_y определится по выражению:

$$\tau_y = f_m \sigma_y = f_m \mu_{ra} \sigma_x. \quad (2.13)$$

Аналогичное выражение для напряжения τ_z :

$$\tau_z = f_{dr} \sigma_z = f_{dr} \mu_{ta} \sigma_x. \quad (2.14)$$

Условие равновесия сил в элементарном слое, без учета собственного веса древесины, имеет вид:

$$BS\sigma_x - BS(\sigma_x - d\sigma_x) + 2\tau_y Bdx + 2\tau_z Sdx = 0, \quad (2.15)$$

или, в соответствии с формулами (2.6) и (2.7):

$$BSd\sigma_x + 2f_m \mu_{ra} \sigma_x Bdx + 2f_{dr} \mu_{ta} \sigma_x Sdx = 0. \quad (2.16)$$

После упрощения, деления переменных на σ_x и $B \cdot S$ уравнение имеет вид:

$$\frac{d\sigma_x}{\sigma_x} + 2\left(f_m \mu_{ra} \frac{1}{S} + f_{dr} \mu_{ta} \frac{1}{B}\right) dx = 0. \quad (2.17)$$

После интегрирования уравнение приобретает вид:

$$\ln|\sigma_x| - \ln|c| = -2\left(f_m \mu_{ra} \frac{1}{S} + f_{dr} \mu_{ta} \frac{1}{B}\right)x. \quad (2.18)$$

Отсюда

$$\sigma_x = ce^{-2\left(f_m \mu_{ra} \frac{1}{S} + f_{dr} \mu_{ta} \frac{1}{B}\right)x}. \quad (2.19)$$

Для определения постоянной c примем $x = 0$. В этом случае $c = \sigma$, т.е. для слоя древесины, находящегося непосредственно под пуансоном, давление прессования равно давлению пуансона. Напряжение в древесине на расстоянии x от дна проушины выразится уравнением:

$$\sigma_x = \sigma e^{-2(f_m \mu_{ra} \frac{1}{S} + f_{dr} \mu_{ta} \frac{1}{B})x} \quad (2.20)$$

Таким образом, с удалением слоя от поверхности, передающей давление (дна проушины), напряжение в древесине будет падать. Если под проушиной высота спрессованного объема древесины равна h_d , то на расстоянии $x = h_d$ от передающей давление поверхности напряжение будет иметь следующее наименьшее значение:

$$\sigma_{min} = \sigma e^{-2(f_m \mu_{ra} \frac{1}{S} + f_{dr} \mu_{ta} \frac{1}{B})h_d} \quad (2.21)$$

Сопротивления от трения с учетом соотношений (2.11) - (2.18), (2.20) выразятся следующим образом:

$$\begin{aligned} T_m &= 2B \int_0^{h_n} \tau_y dx = 2f_m \mu_{ra} B \sigma \int_0^{h_n} e^{-2(f_m \mu_{ra} \frac{1}{S} + f_{dr} \mu_{ta} \frac{1}{B})x} dx = \\ &= \frac{f_m \mu_{ra} B \sigma}{(f_m \mu_{ra} \frac{1}{S} + f_{dr} \mu_{ta} \frac{1}{B})} (1 - e^{-2(f_m \mu_{ra} \frac{1}{S} + f_{dr} \mu_{ta} \frac{1}{B})h_n}) \quad , \end{aligned} \quad (2.22)$$

$$T_{dr} = \frac{f_{dr} \mu_{ta} S \sigma}{(f_m \mu_{ra} \frac{1}{S} + f_{dr} \mu_{ta} \frac{1}{B})} (1 - e^{-2(f_m \mu_{ra} \frac{1}{S} + f_{dr} \mu_{ta} \frac{1}{B})h_n}) \quad (2.23)$$

В соответствии с соотношениями (2.9), (2.10), (2.22), (2.23), усилие прессования определяется по формуле:

$$\begin{aligned} F &= \sigma BS + 2\tau_{ck} Sh_n + \frac{f_m \mu_{ra} B \sigma}{(f_m \mu_{ra} \frac{1}{S} + f_{dr} \mu_{ta} \frac{1}{B})} (1 - e^{-2(f_m \mu_{ra} \frac{1}{S} + f_{dr} \mu_{ta} \frac{1}{B})h_n}) + \\ &+ \frac{f_{dr} \mu_{ta} S \sigma}{(f_m \mu_{ra} \frac{1}{S} + f_{dr} \mu_{ta} \frac{1}{B})} (1 - e^{-2(f_m \mu_{ra} \frac{1}{S} + f_{dr} \mu_{ta} \frac{1}{B})h_n}) = \\ &= \sigma BS (2 - e^{-2(f_m \mu_{ra} \frac{1}{S} + f_{dr} \mu_{ta} \frac{1}{B})h_n}) + 2\tau_{ck} Sh_n \end{aligned} \quad (2.24)$$

При числе проушин, равном n , формула (2.17) приобретает вид:

$$F_n = n \left(\sigma B S \left(2 - e^{-2 \left(f_m \mu_{ra} \frac{1}{S} + f_{dr} \mu_{ta} \frac{1}{B} \right) h_n} \right) + 2 \tau_{ck} S h_n \right). \quad (2.25)$$

Для определения возможности использования модели (2.25) для технологических расчетов необходимо провести экспериментальную оценку усилия прессования. Анализ составляющих уравнения (2.25) с учетом полученных ранее данных [35, 95, 103, 158, 186, 290, 292-294, 322, 362, 388] показывает, что усилие прессования проушин зависит от ряда факторов:

- физико-механических свойств древесины;
- температурно-влажностного состояния древесины;
- скорости прессования;
- габаритных размеров проушин;
- количества формируемых проушин.

Первые три группы факторов влияют на величины значений σ , f_m , f_{dr} , μ_{ra} , μ_{ta} , τ_{ck} [293, 294, 354]. Учитывая эти взаимосвязи, усилие прессования в заготовках одной породы, одинакового размера сечения, можно представить как функцию от ряда параметров процесса: влажности и температуры древесины, скорости прессования, ширины и глубины проушины:

$$F = f(W, t, v, B, h_n). \quad (2.26)$$

Полученные результаты подтверждаются рядом исследований [35, 95, 103, 158, 186, 290, 292-294, 322, 362, 388].

Процесс холодного торцового прессования подразумевает формирование проушин при комнатной температуре; при малых скоростях нагружения процесс можно отнести к статическим. Тогда усилие прессования проушины будет являться функцией от следующих параметров:

$$F = f(W, B, h_n). \quad (2.27)$$

Полученный вывод служит основанием для выбора варьируемых параметров в экспериментальных исследованиях процесса прессования проушин.

2.2.3 Анализ процессов деформирования древесины при внедрении индентора вдоль волокон

Основной выходной характеристикой деформационных изменений при прессовании древесины является степень прессования (п.1.2.3) [293]. Степень прессования для деформированной зоны древесины под проушиной с учетом соотношения (1.1) и схемы на рисунке 2.24 выразится следующим образом:

$$\varepsilon = \frac{h_0 - h_d}{h_0}. \quad (2.28)$$

Перепишем уравнение, используя выражение (2.22):

$$h_0 = h_n + h_d, \quad (2.29)$$

$$\varepsilon = \frac{h_0 - h_d}{h_0} = \frac{h_n + h_d - h_d}{h_n + h_d} = \frac{h_n}{h_n + h_d}. \quad (2.30)$$

Соотношение (2.21) показывает величину напряжений на глубине деформированной зоны h_d . Выразим из этого соотношения значение глубины зоны $h_{d\text{ общ}}$, в которой распространяются общие деформации:

$$h_{d\text{ общ}} = \frac{l}{-2(f_m \mu_{ra} \frac{1}{S} + f_{dr} \mu_{ta} \frac{1}{B})} \ln \frac{\sigma_{min}}{\sigma_c}. \quad (2.31)$$

Под σ_c в выражении (2.21) будем подразумевать усредненное значение напряжения под рабочим торцем пуансона в процессе формирования проушины глубиной h_n . Анализируя выражение (2.21), отметим, что сравнительно малые напряжения в массиве древесины заготовки под проушиной (соответственно малые значения соотношения σ_{min}/σ_c) будут отмечаться на значительной глубине заготовки, т.е. и общие деформации (в том числе и упругие) распространяются на значительную глубину. На рисунке 2.27 приведена графическая интерпретация уравнения (2.21) для заготовки из древесины сосны толщиной $S = 25$ мм.

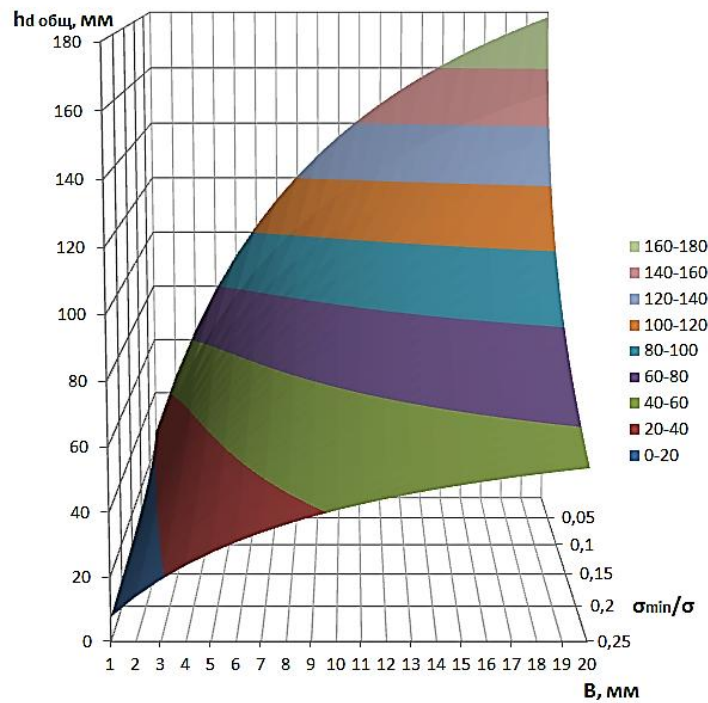


Рисунок 2.27 – Зависимость общей деформации h_d от B и соотношения σ_{min}/σ

Для практических целей наиболее интересно определение глубины пластически деформированной зоны. В работе [294] П.Н. Хухрянский заключает: «Сжатие сухой древесины протекает главным образом за счет остаточной, или пластической, деформации... Пластические деформации у древесины приобретают значение устойчивой величины при наличии значительного коэффициента внутреннего трения... У сухой древесины наполнитель целлюлозного скелета находится в затвердевшем состоянии ... коэффициент внутреннего трения достигает значительной величины... Силы упругости, накопленные в целлюлозном скелете, оказываются недостаточными для преодоления сил внутреннего трения и перемещения деформированного наполнителя». Это мнение поддержано и в более поздних работах [293].

Если под значением σ_{min} подразумевать такую величину напряжений, которые не вызывают пластических деформаций древесины, расположенной под деформированным слоем, то условно можно принять, что это значение равно пределу прочности на сжатие вдоль волокон (для сосны 46 МПа).

Полагая, что усредненное значение напряжения σ_c под рабочим торцом пуансона можно определить с учетом формулы (2.24) по соотношению:

$$\sigma_c = \frac{F}{BS} = \sigma \left(2 - e^{-2\left(f_m \mu_{ra} \frac{1}{S} + f_{dr} \mu_{ta} \frac{1}{B}\right) h_n} \right) + \frac{1}{B} 2\tau_{ck} h_n, \quad (2.32)$$

получим выражение для определения глубины деформированной зоны:

$$h_d = \frac{1}{-2\left(f_m \mu_{ra} \frac{1}{S} + f_{dr} \mu_{ta} \frac{1}{B}\right)} \ln\left(\frac{\sigma_{min}}{\sigma \left(2 - e^{-2\left(f_m \mu_{ra} \frac{1}{S} + f_{dr} \mu_{ta} \frac{1}{B}\right) h_n} \right) + \frac{1}{B} 2\tau_{ck} h_n} \right). \quad (2.33)$$

Здесь за значение σ примем предел прочности на сжатие вдоль волокон $\sigma_c = 46$ МПа. Пример графической интерпретации полученной зависимости прогнозного значения глубины деформированной зоны h_d приведен на рисунке 2.28. Величина h_d возрастает с увеличением глубины внедрения пуансона (глубины проушины) h_n .

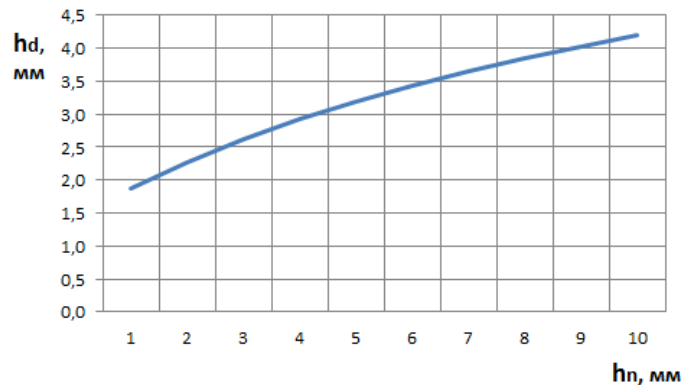


Рисунок 2.28 – Зависимость пластической деформации h_d от h_n для $B = 2$ мм

Анализируя уравнение (2.33) по той же схеме, что и уравнение (2.25) в п. 2.2.1, получим, что h_d в заготовках одной породы, одинакового размера сечения, можно представить как функцию от ряда параметров режима процесса холодного прессования: состояния древесины (влажности), ширины и глубины проушины:

$$h_d = f(W, B, h_n). \quad (2.34)$$

Полученный вывод служит основанием для выбора варьируемых параметров в экспериментальных исследованиях процесса прессования проушин.

2.3 Моделирование процесса внедрения индентора в древесину в программной системе прочностного конечно-элементного анализа

Внедрение процесса формирования шипов способом прессования в существующие технологические потоки изготовления клееной продукции требует исследования параметров технологической системы, включающей инструмент и заготовку. В настоящее время разработаны в основном рекомендации, касающиеся выбора параметров пуансонов для местного прессования древесины поперек волокон, включая процессы тиснения. Так, в работе [4] изложены результаты исследований различных форм сечений клиновых пуансонов. Данные результаты не применимы в случае торцового прессования древесины пуансонами других форм, поэтому данные вопросы требуют проведения отдельных исследований. В частности, проектирование пуансонов затрудняется отсутствием рекомендаций по выбору материала для их изготовления, рекомендаций по размерам выступов, формирующих проушины.

Древесина является анизотропным материалом сложного строения, в связи с чем получение аналитических моделей многих процессов затруднено и требует введения ряда эмпирических коэффициентов, зависящих от состояния древесины. В то же время численные методы моделирования на основе компьютерных программ позволяют получить достаточно точные оценки для напряженных состояний и деформаций исследуемых материалов [4, 93, 330, 340, 363, 368, 388].

2.3.1 Расчетная схема и постановка задач моделирования

Схема процесса прессования (рисунок 2.29) включает заготовку из древесины, в торец которой внедряется пуансон с выступами прямоугольной формы сечения. Профиль пуансона соответствует форме и размерам получаемых в древесине прямоугольных шипов и проушин. Форма и размеры моделей пуансона и заготовки приведены на рисунке 2.30.

Задачи исследования:

- провести моделирование на основе метода конечных элементов для процесса прессования прямоугольных проушин в заготовках из древесины сосны на примере формирования одной и пяти проушин;

- оценить напряженное состояние материала инструмента и заготовки, проанализировать результаты и дать рекомендации по выбору параметров конструкции пуансонов.

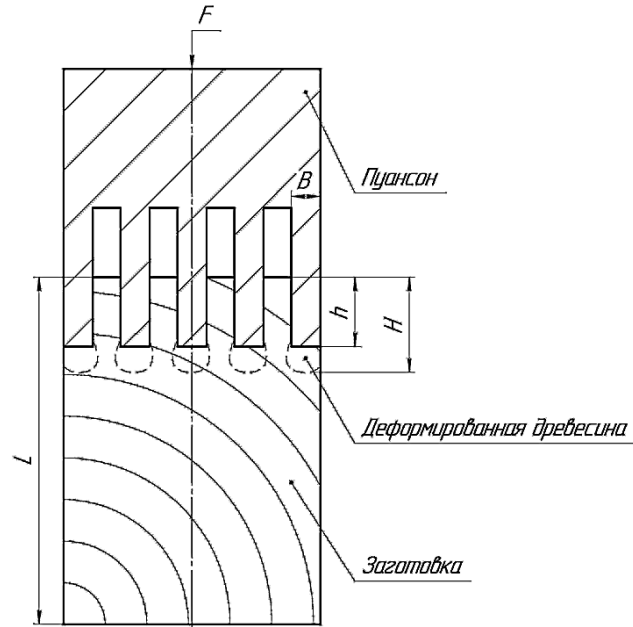


Рисунок 2.29 – Схема формирования проушины пуансоном: F – усилие прессования, B – ширина проушины, h – глубина проушины, H – расстояние до нижней границы деформированной зоны, L – высота заготовки

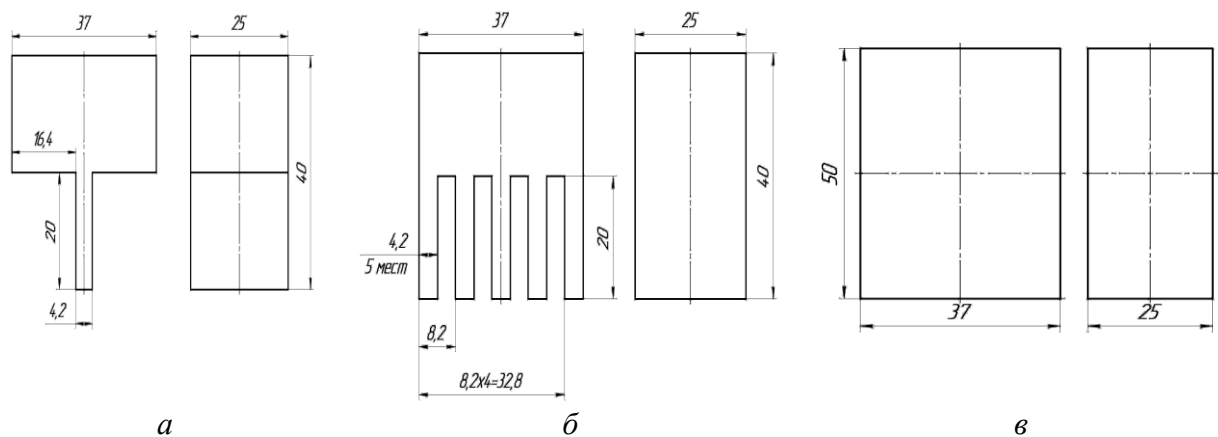


Рисунок 2.30 – Форма и размеры моделей: a – пуансон с одним рабочим выступом; b – пуансон с пятью рабочими выступами; $в$ – заготовка [212]

2.3.2 Этапы прочностного конечно-элементного анализа

Моделирование процесса прессования прямоугольных проушин в заготовках из древесины сосны проведено в системе КОМПАС-3D. Данное программное обеспечение позволяет реализовать решение инженерных задач по оптимизации конструкций на основе метода конечных элементов. Прочностной конечно-элементный анализ для твердотельных деталей включал следующие этапы:

- разработку схемы процесса прессования;
- геометрическое моделирование пуансонов и заготовки;
- создание набора исходных данных;
- задание закреплений и приложение нагрузки;
- генерация конечно-элементной сетки;
- выполнение расчетов;
- анализ полученных результатов в виде карт напряжений.

В расчете приняты следующие исходные данные:

- температура помещения, инструмента и заготовки – 20 °С;
- материал пуансона – Ст3сп ГОСТ 380-2005;
- удельное усилие прессования $F = 50$ МПа;
- материал заготовки – сосна;
- удельное усилие обжима заготовки $F_1 = 0,05$ МПа;
- влажность древесины заготовки $W = 12$ %.

Для создания конечно-элементной сетки выбраны следующие характеристики:

- длина стороны конечных элементов – тетраэдров, равная 1,25 мм;
- максимальный коэффициент сгущения на поверхности – 1;
- коэффициент разрежения в объеме – 1,5.

Справочные значения механических свойств материалов заготовки [275] и пуансона [141], принятых в процессе моделирования, приведены также в работах [79, 212].

В результате моделирования процесса прессования получены значения напряжений по Мизесу, представленные на рисунке 2.31.

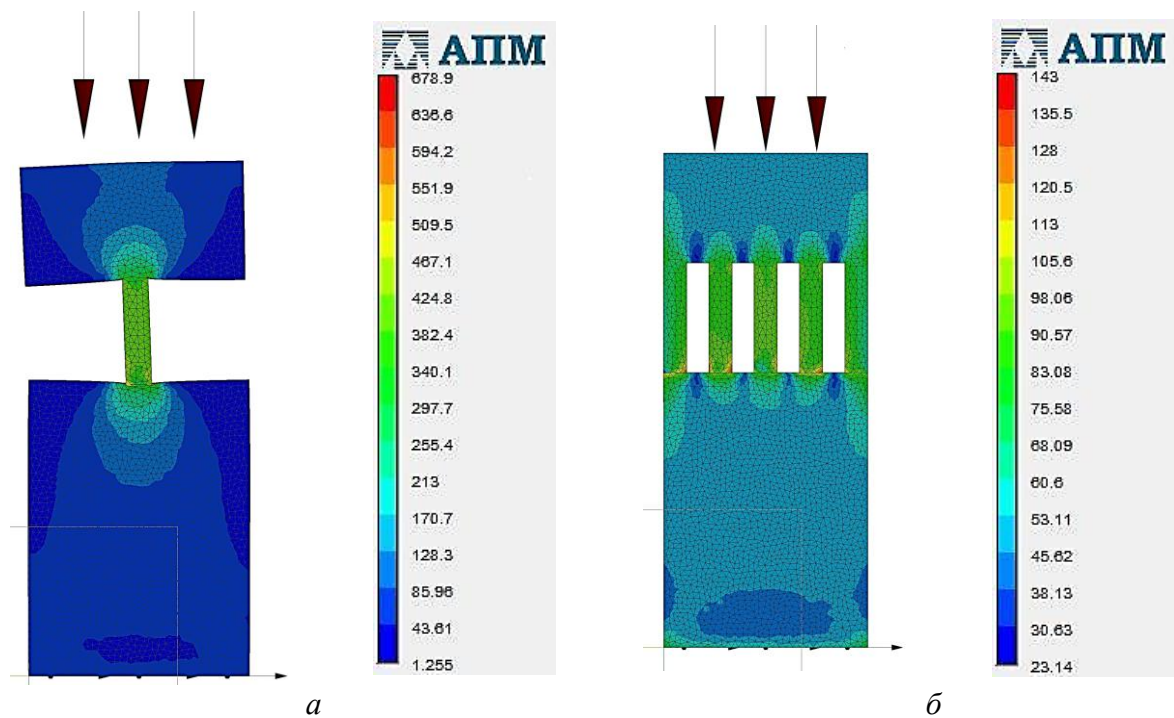


Рисунок 2.31 – Распределение напряжений в заготовке и пуансоне в процессе прессования проушин: *а* – пуансон с одним рабочим выступом; *б* – пуансон с пятью рабочими выступами

2.3.3 Анализ результатов моделирования

Максимальные значения напряжений (для пуансона с одним выступом – 678,9 МПа, для пуансона с пятью выступами – 143 МПа) сконцентрированы на краях выступов. Для пуансона с одним выступом полученные напряжения превышают предельно допустимые для испытываемого материала СтЗсп, в связи с чем существует риск деформации кромок выступа пуансона при изготовлении одной проушины. На этом основании можно рекомендовать использование инструмента с многократными выступами.

Таким образом, геометрическое моделирование и прочностной конечно-элементный анализ для процесса формирования одной и пяти прямоугольных проушин в заготовках из древесины сосны позволило установить

точки концентрации максимальных напряжений: в заготовках – под рабочей поверхностью пуансона, в инструменте – на кромках выступов; показатели напряженного состояния древесины заготовки подтверждают возможность получения качественного рельефного отпечатка в виде проушины без разрушения прилегающих боковых граней шипов; максимальные значения напряжений на кромках пуансона для формирования многократных шипов, изготовленного из стали СтЗсп, не превышают предела ее прочности, что позволяет использовать данный инструмент для серийной обработки заготовок шиповых соединений.

2.4 Обоснование требуемой точности формирования шипов способом торцового прессования

Сращивание древесины по длине в настоящее время производится в основном на зубчатые шипы [32, 341]. Прямоугольные фрезерованные шипы применяются в основном в угловых концевых и ящичных соединениях. Для формирования рамок используют рамные шипы [73]: одинарный, двойной, реже тройной; для формирования коробок ящиков — многократные прямоугольные шипы. Установлено, что существенное влияние на прочность угловых соединений на прямоугольные шипы оказывает тип посадки [127-129; 326, 328]. В связи с этим разработан ряд рекомендаций по выбору посадок для соединений данного типа [190, 326, 339].

Сращивание по длине на прямоугольные шипы предлагалось ранее в работах [8, 9, 24, 336, 392], однако рекомендации по размерно-точностным характеристикам шиповых соединений на настоящий момент отсутствуют. Промышленное внедрение способа сращивания на прямоугольные прессованные шипы сдерживается отсутствием научно обоснованных рекомендаций по выбору посадок в соединении шип-проушина и связанных с этим рекомендаций по параметрам и точности изготовления инструмента.

Целью исследования является обоснование диапазона посадок для соединений по длине на многократные прямоугольные шипы.

Задачи исследования:

- анализ рекомендаций, приведенных в стандартах и научно-технической литературе, по выбору посадок на прямоугольные шипы различных типов;
- расчет характеристик рекомендуемых в литературе посадок и выработка новых рекомендаций по выбору посадок для клеевых соединений по длине на прямоугольные шипы малых толщин;
- разработка требований к конструктивным параметрам рабочих выступов пуансона.

2.4.1 Анализ посадок в шиповых соединениях, выполненных в соответствии с существующими рекомендациями

2.4.1.1 Анализ рекомендаций по выбору точности и полей допусков в шиповых соединениях.

Требования к заготовкам и изделиям с использованием шиповых клеевых соединений изложены в стандартах ГОСТ 33081-2014, ГОСТ 475-2016, 30972-2002, 20850-2014 и ряде других [54, 55, 57, 59, 61, 62, 67, 68, 250-253], которые ссылаются на ГОСТ 19414 и 9330 [53, 73], содержащие требования к шиповым соединениям.

Точность изготовления элементов основных соединений деталей из древесины нормируется ГОСТ 9330-2016 [73], точность зубчатых клеевых соединений – ГОСТ 19414-90 [53]; данные стандарты включают ссылки на ГОСТ 6449.1-82 [69], содержащий ряд рекомендуемых посадок и величины допускаемых отклонений от номинальных размеров. Указанные стандарты и справочно-техническая литература [146, 190, 201, 244] содержат указания по точности изготовления прямоугольных шипов применительно к угловым со-

единениям на рамные либо ящичные шипы, а также по точности зубчатых клеевых соединений, применяемых для соединений деталей по длине.

Так, в ГОСТ 19414 указано, что точность формирования зубчатых шипов должна соответствовать 13 качеству по ГОСТ 6449.1, при этом толщина клеевого слоя не должна превышать 0,1 мм. Для угловых концевых соединений на прямоугольные шипы в справочной литературе, как правило, рекомендуется точность изготовления ширины проушины и толщины шипа по 13 качеству, точность изготовления длины шипа и глубины проушины – по 13 – 15 качествам [190]. Есть рекомендации по выбору 12 – 14 качества для рамных шипов [256].

Разработаны также рекомендации по выбору полей допусков для разных типов соединений [190, 256, 301]. Рекомендуемые поля допусков по толщине шипа: для угловых концевых соединений типа УК-1, УК-2, УК-6, угловых ящичных УЯ-1, угловых срединных УС-1: $h13$, $js13$, $k13$, $za13$; по ширине проушины – $H13$. Например, для соединения типа *УК-1* на шип одинарный открытый сквозной рекомендована посадка $H13/k13$ по толщине шипа (ширине проушины), поле допуска $h13$ для длины шипа, $H15$ для глубины проушины [190]. Рекомендованные посадки по толщине шипа (ширине проушины): $H13/h13$, $H13/js13$, $H13/k13$, $H13/za13$.

Известны и другие результаты исследований в данной области. Вопросы, связанные с влиянием типа посадки на прочность клеевого шипового соединения, рассмотрены в работах [105, 118, 127-129, 326, 329, 335, 366, 377, 391]. Установлено, что точность изготовления соединения и тип посадки по толщине шипа (ширине проушины) существенно влияют на его прочностные показатели [328, 383].

Некоторые исследователи при определении прочностных характеристик соединений на прямоугольные шипы принимают в качестве базовой посадку с зазором 0,02 – 0,05 мм [329] и более [335], в том числе с толщиной клеевого шва 0,1 мм [315, 330, 366, 377]. Однако результаты экспериментальных исследований [129, 326] позволили заключить, что посадки с натя-

гом имеют ряд преимуществ перед традиционно используемыми посадками с зазором. Для шипов толщиной 10 мм в работе [326] предложен натяг 0,1 – 0,2 мм, в работе [129] – 0,3 мм, для шипов толщиной 16 мм в работе [339] – 0,2 мм. Повышенные значения натягов обеспечивают устойчивую прочность соединения до $4,5 \cdot 10^5$ Н/м² [129].

Данные, полученные в работах [129, 328, 383], показывают высокую степень корреляции между уменьшением зазора (увеличением натяга) в посадке и повышением прочности. Это может объясняться поверхностным уплотнением древесины в соединении и сниженной толщиной клеевого слоя [326]. Экспериментальные исследования [325] выявили влияние снижения толщины клеевого шва на повышение прочности соединений. Численное моделирование на основе метода конечных элементов [340, 352, 388] подтверждает повышение прочности клеевых соединений при выборе посадок с натягом.

Существуют и противоположные мнения о необходимости зазора при сборке клеевых соединений для предотвращения «голодного склеивания» [297], что указывает на необходимость теоретической и экспериментальной проверки заключений, получаемых в данном разделе.

ГОСТ 9330 рекомендует натяг в шиповых соединениях от 0 до 0,3 мм [73] с целью достижения наибольшей прочности склеивания. Для шипов из древесины твердых лиственных пород величину натяга принимают от 0 до 0,2 мм, из хвойных и мягких лиственных – от 0,1 до 0,3 мм.

Рассмотрим диапазоны изменения зазоров и натягов в рекомендованных посадках по толщине шипа ($H13/h13$, $H13/js13$, $H13/k13$, $H13/za13$) с целью определения соответствия требованиям ГОСТ 9330. Поскольку ГОСТ 9330 не назначает метод расчета величины натяга в соединениях, его рекомендации можно интерпретировать в нескольких вариантах: нормирование вероятностных предельных натягов, максимальных натягов или средних натягов.

2.4.1.2 Расчет посадок по вероятностному методу.

В ГОСТ 9330 указано, что «величина отклонений... устанавливается в технической документации на конкретные изделия и должна соответствовать требованиям ГОСТ 6449.1...» [73]. ГОСТ 6449.1 определяет в качестве критериев выбора посадки вероятностные предельные зазоры или натяги. При этом действительные натяги или зазоры группируются вокруг их среднего значения; вероятность выхода их действительных значений за вероятностные предельные значения составляет не более 0,27 % [256].

В таблице 2.1 приведены вероятностные предельные зазоры «-» и натяги «+», рассчитанные по методике [256] для посадок $H13/h13$, $H13/js13$, $H13/k13$, $H13/za13$ в соединениях шип-проушина на одинарный шип по толщине шипа (ширине проушины) для диапазона наиболее часто применяемых толщин шипов 0 – 30 мм.

Таблица 2.1 – Вероятностные предельные зазоры «-» и натяги «+» для посадок по толщине шипа (ширине проушины), мм

Посадка	Интервал размеров						
	до 3 мм	св.3 до 6	св. 6 до 10	св. 10 до 14	св. 14 до 18	св. 18 до 24	св. 24 до 30
$H13/h13$	-0,04 -0,24	-0,05 -0,31	-0,06 -0,38	-0,08 -0,46	-0,08 -0,46	-0,10 -0,56	-0,10 -0,56
$H13/js13$	+0,03 -0,17	+0,04 -0,22	+0,05 -0,27	+0,06 -0,32	+0,06 -0,32	+0,07 -0,39	+0,07 -0,39
$H13/k13$	+0,10 -0,10	+0,13 -0,13	+0,16 -0,16	+0,19 -0,19	+0,19 -0,19	+0,23 -0,23	+0,23 -0,23
$H13/za13$	+0,13 -0,07	+0,17 -0,09	+0,21 -0,11	+0,25 -0,13	+0,27 -0,11	+0,33 -0,13	+0,35 -0,11

Результаты расчета проиллюстрированы на рисунках 2.32, 2.33. Анализируя полученные результаты, отметим, что посадка $H13/h13$ с величиной вероятностного предельного натяга, равной - 0,04...- 0,1 мм (т.е. зазору + 0,04...+ 0,1 мм) для диапазона наиболее часто применяемых толщин шипов 0 – 30 мм, не вписывается в регламентированный ГОСТ 9330 диапазон натягов от 0 до 0,3 мм. Посадка $H13/js13$ с вероятностным предельным натягом от

+ 0,03 до + 0,07 мм в рассматриваемом диапазоне размеров соответствует ГОСТ 9330 лишь в части требований для твердых лиственных пород (от 0 до + 0,2 мм) и не входит в диапазон натягов для соединений из хвойных и мягких лиственных пород (от + 0,1 до + 0,3 мм). Посадки *H13/k13* и *H13/za13* могут быть рекомендованы для большинства размеров из рассматриваемого диапазона, за исключением посадки *H13/za13* для размеров свыше 18 мм.

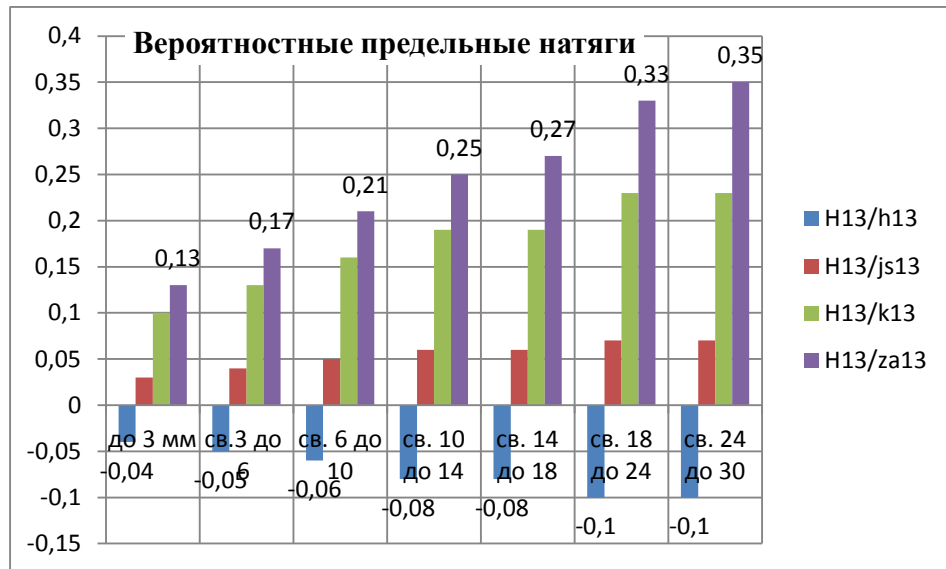


Рисунок 2.32 – Вероятностные предельные натяги для посадок *H13/h13*, *H13/js13*, *H13/k13*, *H13/za13* в интервале размеров от 0 до 30 мм

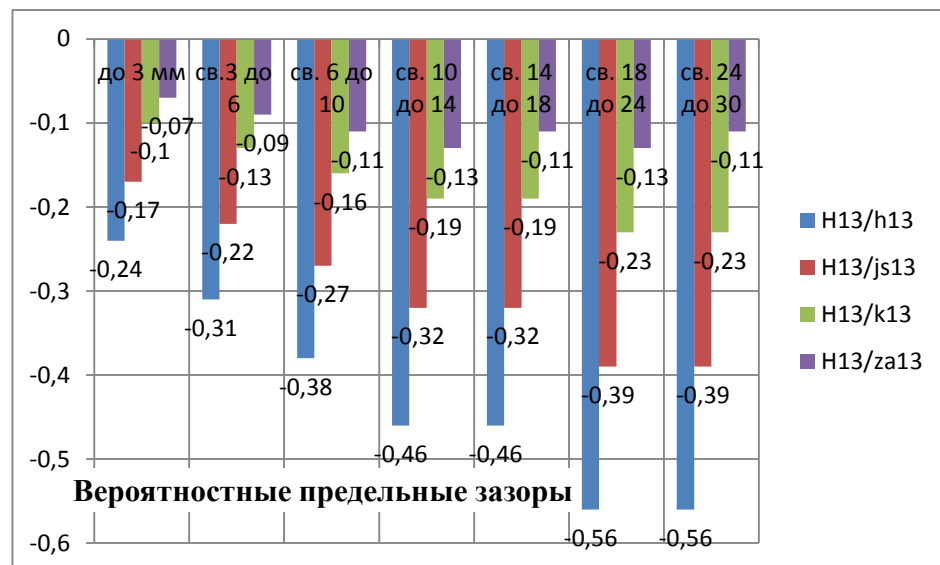


Рисунок 2.33 – Вероятностные предельные зазоры для посадок *H13/h13*, *H13/js13*, *H13/k13*, *H13/za13* в интервале размеров от 0 до 30 мм

2.4.1.3 Расчет посадок по методу максимума-минимума.

Максимальный натяг является значимым показателем. Так, контроль максимального натяга использован при проведении экспериментальных исследований [127-129] в качестве критерия, влияющего на прочность шиповых соединений. Установлена оптимальная величина максимального натяга по толщине шипа, равная + 0,3 мм, для размеров шипа $10 \times 40 \times 40$ мм. Такой натяг обеспечил прочность клеевого соединения на скалывание до $4 \cdot 10^5$ Н/м². Поэтому для указанных посадок также проведены расчеты по методам максимума-минимума по методике [256].

Метод расчета на максимум-минимум включает определение предельных значений зазоров или натягов при самых неблагоприятных сочетаниях размеров отверстий и валов. Для переходных посадок это наибольший зазор S_{max} и наибольший натяг N_{max} . В таблице 2.2 приведены величины зазоров и натягов в рекомендованных посадках, рассчитанные по данным ГОСТ 6449.1.

Таблица 2.2 – Предельные и средние значения зазоров и натягов в посадках по толщине шипа, мм

Посадка	Характеристика зазора/натяга	Интервал размеров						
		до 3 мм	св.3 до 6	св. 6 до 10	св. 10 до 14	св. 14 до 18	св. 18 до 24	св. 24 до 30
H13/h13	S_{max}	0,28	0,36	0,44	0,54	0,54	0,66	0,66
	S_{min}	0	0	0	0	0	0	0
	S_c	0,14	0,18	0,22	0,27	0,27	0,33	0,33
H13/js13	N_{max}	0,07	0,09	0,11	0,13	0,13	0,17	0,17
	S_{max}	0,21	0,27	0,33	0,40	0,40	0,49	0,49
	S_c	0,07	0,09	0,11	0,135	0,135	0,16	0,16
H13/k13	N_{max}	0,14	0,18	0,22	0,27	0,27	0,33	0,33
	S_{max}	0,14	0,18	0,22	0,27	0,27	0,33	0,33
	N_c	0	0	0	0	0	0	0
H13/za13	N_{max}	0,17	0,22	0,27	0,33	0,35	0,43	0,45
	S_{max}	0,11	0,14	0,17	0,21	0,19	0,23	0,21
	N_c	0,03	0,04	0,05	0,06	0,08	0,1	0,12

Посадка *H13/h13* позволяет создать отвечающий части требований натяг, равный 0, только в случае сочетания максимального размера шипа и минимального размера проушины. Остальные сочетания размеров дают зазор в соединении. Посадка *H13/js13* отвечает требованиям по величине максимального натяга в интервале размеров свыше 6 до 30 мм; посадка *H13/k13* – от 0 до 18 мм; посадка *H13/za13* – от 0 до 10 мм.

2.4.1.4 Расчет средних значений натяга или зазора.

В таблице 2.2 приведены значения N_c (S_c), рассчитанные для рассматриваемых посадок. По данным, приведенным в таблице, можно заключить, что из всех рассмотренных посадок лишь посадка *H13/za13* дает требуемый натяг в диапазоне размеров свыше 18 до 30 мм.

В таблице 2.3 приведены результаты анализа величин зазоров (натягов) в рекомендуемых посадках [190] для размерного интервала наиболее часто применяемых толщин шипов 0 – 30 мм.

Таблица 2.3 – Соответствие зазоров и натягов в посадках требованиям ГОСТ 9330*

Посадка	Метод расчета		
	вероятностный	на максимум-минимум	средние значения зазора/натяга
H13/h13	Не соответствует	<u>До 30 мм**</u> До 30 мм**	Не соответствует
H13/js13	<u>До 30 мм</u> Не соответствует	<u>До 30 мм</u> Свыше 6 до 30 мм	Не соответствует
H13/k13	<u>До 18 мм</u> До 30 мм	<u>До 6 мм</u> До 18 мм	<u>До 30 мм</u> Не соответствует
H13/za13	<u>До 6 мм</u> До 18 мм	<u>До 3 мм</u> До 10 мм	<u>До 30 мм</u> Свыше 18 до 30 мм

* В числителе – значения для твердых лиственных пород, в знаменателе – для хвойных и мягких лиственных пород.

**При условии сочетания максимальной толщины шипа и минимальной ширины проушины.

Таким образом, в качестве предпочтительных посадок для прямоугольных шипов малых толщин до 3 – 10 мм в угловых соединениях можно отметить посадки *H13/k13* и *H13/za13* с натягами от 0 до + 0,27 мм. По аналогии

можно рекомендовать подобные посадки для соединений по длине на прямоугольные шипы, с их экспериментальным обоснованием. В задачи дальнейших исследований входит определение влияния типа посадки на прочностные свойства соединений по длине на прямоугольные прессованные шипы, с учетом точности, достигаемой при холодном торцовом прессовании шипов (11 квалитет).

2.4.1.5 Выводы.

1) Рекомендации по выбору посадок в угловых концевых соединениях на прямоугольные шипы, приведенные учебно-справочной литературе, имеют расхождений с требованиями ГОСТ 9330 по обеспечению натяга от 0 до 0,3 мм и с заключениями по результатам проведенных ранее экспериментальных исследований по определению влияния величины натяга на прочность соединения. Представляется целесообразным уточнить требования в регламентирующих документах по величине натягов с учетом диапазона размеров шипа по толщине.

2) Расчет посадок тремя методами: вероятностным, на максимум-минимум, по средним значениям зазора/натяга показал, что посадка $H13/h13$ не соответствует требованиям стандарта, посадка $H13/js13$ ограниченно применима в части исследуемого интервала толщин шипа, посадка $H13/k13$ в основном отвечает требованиям в части исследуемого интервала, посадка $H13/za13$ соответствует требованиям при малых толщинах шипа.

3) Наиболее близки к требованиям ГОСТ 9330 и рекомендациям ранее проведенных исследований посадки $H13/k13$ и $H13/za13$ с натягами до + 0,27 мм. Посадки $H13/k13$ и $H13/za13$ обеспечивают требуемые расчетные натяги в заготовках из твердых лиственных пород для шипов толщиной до 3 мм. Расчеты посадок $H13/k13$ и $H13/za13$ для заготовок из хвойных и мягких лиственных пород по вероятностному методу и на максимум-минимум показали их применимость для шипов толщиной до 10 мм, однако метод средних значений не позволяет однозначно рекомендовать данные посадки.

Результаты исследований требуют экспериментального подтверждения и могут быть использованы при планировании и проведении экспериментальных исследований прочности клеевых соединений на прямоугольные шипы.

4) Рекомендации по полям допусков варьируются в зависимости от назначения изделия, а требования к толщине шва и натягу находятся в противоречии друг к другу, поэтому данные вопросы требуют обоснованного решения в настоящей работе.

2.4.2 Расчет посадок соединений на прямоугольные шипы с учетом особенностей назначения допусков многоэлементных соединений

Для нормального функционирования шипового соединения необходимо, чтобы составляющие его элементы занимали определенное положение относительно друг друга. При конструировании соединения необходимо провести размерный анализ и расчет параметров взаимосвязанных размеров с использованием теории размерных цепей. При этом необходимо помнить, что соединение на прямые ящичные шипы является многоэлементным. Его характер будет определяться как допусками размеров элементов, так и допусками расположения этих элементов относительно баз [201, 256].

Для углового ящичного соединения на шип открытый прямой УЯ-1 рекомендована посадка $H13/j_5,13$ по толщине шипа (ширине проушины), поле допуска $k13$ для шага шипов, $a13$ для длины шипа, $H15$ для глубины проушины [190, 265]. В источнике [146] приведены рекомендации по предельным отклонениям размеров, равным $\pm 0,12$ мм, для расстояния между двумя любыми шипами при посадке по толщине шипа $H13/k13$.

Можно провести аналогию многошипового соединения с рядом отверстий. В соответствии с ГОСТ 6449.4 [70], для соединений типа С (крепёжные детали входят в отверстия соединяемых деталей с натягами, при этом натяг односторонний по отношению к каждой из соединяемых деталей) рекомендуются поля допусков: для отверстий $H13$, $H14$, для валов (крепёжных дета-

лей, круглых вставных шипов) – $k13, k14$. Для древесины хвойных и мягких лиственных пород рекомендуется значение одностороннего натяга $0,20 - 0,25$ мм, для твердых лиственных пород и березы $0,15 - 0,20$ мм. При этом позиционные допуски осей отверстий T в диаметральной выражении для вероятностного предельного натяга $N_{max\ вер} = 0,13$ мм, для интервала размеров свыше 3 до 6 мм, варьируются в зависимости от допускаемого натяга $N_{дон}$ в соединении в диапазоне $T = 0,10 - 0,40$ мм, что соответствует диапазону предельных отклонений размеров, координирующих оси отверстий $\pm (0,04 \div 0,14)$ мм. Таким образом, требования к расположению ряда отверстий под крепления намного жестче, чем к многократным шипам.

2.4.2.1 Решение обратной задачи.

Используя имеющиеся на данный момент рекомендации [146, 190, 265] по параметрам проушин и шага шипов, решим обратную задачу: по известным параметрам составляющих звеньев размерной цепи определим параметры замыкающего звена – ширины шипа.

Составим размерную цепь для элементов шипового соединения. Номинальная толщина шипа (ширина проушины) составляет 2 мм. В качестве замыкающего звена выберем толщину шипа. Обозначим его A_{Δ} . Ширину проушины обозначим как A_2 , шаг шипов – A_1 (рисунок 2.34).

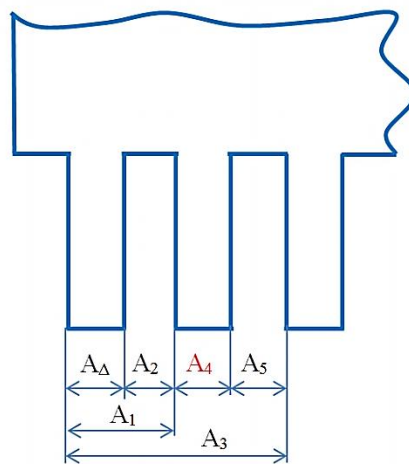


Рисунок 2.34 – Схема размерной цепи

1) *Определение номинального размера.*

В общем случае формула размерной цепи имеет вид [256]:

$$A_{\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_{A_i} A_i, \quad (2.35)$$

где A_{Δ} - номинальный размер замыкающего звена размерной цепи A ;

i – порядковый номер составляющего звена;

m – количество звеньев цепи;

A_i – номинальный размер i -го составляющего звена;

ξ_{A_i} – передаточное отношение i -го составляющего звена размерной цепи A , $\xi_{A_i} = 1$ для увеличивающих составляющих звеньев; $\xi_{A_i} = -1$ для уменьшающих.

Данная цепь является линейной с параллельными звеньями. Звено A_1 является увеличивающим, A_2 – уменьшающим. Тогда для рассматриваемой цепи формула будет иметь простой вид:

$$A_{\Delta} = A_1 - A_2, \quad (2.36)$$

При шаге шипов $A_1=4$ мм, ширине проушины $A_2=2$ мм, номинальная толщина шипа будет равна

$$A_{\Delta} = 4 - 2 = 2 \text{ мм.} \quad (2.37)$$

2) *Определение допуска замыкающего звена δ_{Δ} (толщины шипа).*

При расчете по методу максимума-минимума (методу полной взаимозаменяемости) допуск замыкающего звена определяется по формуле [146, 256]:

$$\delta_{\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} |\xi_{A_i}| \delta_i, \quad (2.38)$$

где δ_i – допуск i -го составляющего звена.

Из формулы (2.38) следует, что знак передаточного звена не влияет на величину δ_{Δ} , и для линейной цепи с параллельными звеньями допуск замыкающего звена равен сумме допусков составляющих звеньев. Таким образом, для рассматриваемой цепи:

$$\delta_{\Delta} = \delta_1 + \delta_2. \quad (2.39)$$

Для ширины проушины выше рекомендовано поле допуска $H13$, поэтому верхнее предельное отклонение $\Delta_{\text{верх } i} = es_i = +0,14$ мм, нижнее – $\Delta_{\text{ниж } i} = es_i = 0$. Тогда допуск i -го звена определяется по формуле:

$$\delta_i = \Delta_{\text{верх } i} - \Delta_{\text{ниж } i} = es_i - ei_i = IT, \quad (2.40)$$

тогда

$$\delta_2 = 0,14 - 0 = 0,14 \text{ мм.}$$

Шаг шипов в соответствии с рекомендациями [190] выполняется по полю допуска $k13$. Верхнее предельное отклонение $es_i = +0,18$ мм, нижнее – $es_i = 0$ мм. Допуск на шаг шипов будет определяться по соотношению:

$$\delta_{1p} = 0,18 - 0 = 0,18 \text{ мм.}$$

В то же время по другим рекомендациям [146] $es_i = +0,12$ мм, $es_i = -0,12$ мм, тогда:

$$\delta_{1m} = 0,12 - (-0,12) = 0,24 \text{ мм.}$$

Допуск замыкающего звена составит:

$$\delta_{\Delta p} = 0,18 + 0,14 = 0,32 \text{ мм.}$$

Или по [146]:

$$\delta_{\Delta m} = 0,24 + 0,14 = 0,38 \text{ мм.}$$

При расчете по вероятностному методу, при нормальном законе распределения отклонений и риске 0,27 %, допуск замыкающего определяется по формуле [256]:

$$\delta_{\Delta \text{вер}} = \sqrt{\sum_{i=1}^{m-1} \delta_i^2}, \quad (2.41)$$

$$\delta_{\Delta \text{вер } p} = \sqrt{0,18^2 + 0,14^2} = \sqrt{0,0324 + 0,0196} = \sqrt{0,052} = 0,22804 \approx 0,23 \text{ мм.}$$

Допуск, определенный по вероятностному методу, имеет меньшую величину по сравнению с допуском, определенным по методу максимума-минимума. Разница между числами, полученными двумя методами, составляет $0,32 - 0,23 = 0,09$ мм.

По [146]:

$$\delta_{\Delta \text{вер } m} = \sqrt{0,24^2 + 0,14^2} = \sqrt{0,0576 + 0,0196} = \sqrt{0,0772} = 0,27785 \approx 0,28 \text{ мм.}$$

3) *Расчет координаты середины поля допуска замыкающего звена (толщины шипа).*

Координата $\Delta_{0\Delta}$ середины поля допуска замыкающего звена, в соответствии с [129, 146]:

$$\Delta_{0\Delta} = \sum_{i=1}^{m-1} \xi_{A_i} \left(\frac{\Delta_{\text{верх } i} + \Delta_{\text{ниж } i}}{2} \right) = \sum_{i=1}^{m-1} \frac{es_i - ei_i}{2}. \quad (2.48)$$

Тогда

$$\Delta_{0\Delta p} = \left(\frac{0,18 + 0}{2} \right) - \left(\frac{0,14 + 0}{2} \right) = 0,02 \text{ мм}, \quad (2.49)$$

$$\Delta_{0\Delta m} = \left(\frac{0,12 - 0,12}{2} \right) - \left(\frac{0,14 + 0}{2} \right) = -0,07 \text{ мм}. \quad (2.50)$$

4) *Определение верхнего $\Delta_{\text{верх } \Delta}$ и нижнего $\Delta_{\text{ниж } \Delta}$ предельных отклонений замыкающего звена (толщины шипа).*

Расчет проведем с учетом результатов, полученных по методу максимума-минимума, по формулам, приведенным в [146]:

$$\Delta_{\text{верх } \Delta} = \Delta_{0\Delta} + \frac{\delta_{0\Delta}}{2}, \quad (2.51)$$

$$\Delta_{\text{ниж } \Delta} = \Delta_{0\Delta} - \frac{\delta_{0\Delta}}{2}. \quad (2.52)$$

Получим:

$$\Delta_{\text{верх } \Delta p} = 0,02 + \frac{0,32}{2} = 0,18 \text{ мм}, \quad (2.53)$$

$$\Delta_{\text{ниж } \Delta p} = 0,02 - \frac{0,32}{2} = -0,14 \text{ мм}, \quad (2.54)$$

что не укладывается в диапазон предельных отклонений, рекомендованного для шипа поля допуска j_s13 (для размера 2 мм это $\pm 0,07$ мм), а также в поле допуска j_s14 (с предельными отклонениями $\pm 0,12$ мм) и соответствует лишь полю допуска j_s15 с отклонениями $\pm 0,20$ мм; или:

$$\Delta_{\text{верх } \Delta m} = -0,07 + \frac{0,38}{2} = 0,26 \text{ мм}, \quad (2.53)$$

$$\Delta_{\text{ниж } \Delta m} = -0,07 - \frac{0,38}{2} = -0,12 \text{ мм}, \quad (2.54)$$

что также отличается от типовых полей допусков, рекомендованных ГОСТ 6449.1. Ближайшее к указанным отклонениям поле – j_s16 с отклонениями $\pm 0,30$ мм.

При расчете этих величин по вероятностному методу, при условии совпадения центра группирования отклонений с серединой поля допуска (нормальный закон распределения, совпадающий с полем допуска), верхнее и нижнее предельные отклонения замыкающего звена (толщины шипа) по формулам, приведенным в [256], получены аналогичные результаты: ближайшее к рассчитанным отклонениям поле (с учетом его расположения) – $k14$ с верхним отклонением $+0,25$ и нулевым нижним, либо j_s15 с отклонениями $\pm 0,20$ мм.

Повторив подобные расчеты для цепи 2 ($A_4 = A_3 - A_1 - A_5$), цепи 3 ($A_7 = A_6 - A_3 - A_8$) и т.д., с допуском шага шипов в первом варианте в соответствии с [190] по полю допуска $k13$, во втором варианте равным по [146] $\pm 0,12$ мм, а также в третьем варианте по аналогии с требованиями для расположения осей отверстий от общей плоскости по ГОСТ 6449.4, равным $\pm(0,04-0,16)$ мм, получили следующие результаты. Для цепей 2, 3 и 4 и т.д. ближайшие поля допусков по методу максимума-минимума – j_s16 , j_s17 , а по вероятностному методу – j_s15 , j_s16 . При этом бóльшие значения качеств получены при выполнении рекомендаций по требованиям [149, 190].

Будем считать, что в случае использования сборного пуансона для шипа в заготовке из древесины следует выбирать поле допуска j_s , так как пазы (проушины) в инструменте формируются за счет установки вкладышей. В случае использования цельного пуансона для шипа в заготовке из древесины лучше выбирать поле допуска k , которое также соответствует требованиям расчета.

Расчет величин предельных зазоров и натягов для посадок $H13/j_s15$ и $H13/j_s17$ по формулам, приведенным в [69, 127-129] дает следующие результаты: наибольший натяг S_{max} равен соответственно 0,20 и 0,50 мм, наибольший зазор N_{max} равен соответственно 0,34 и 0,64 мм. Расчет вероятностных

значений показал, что максимальный вероятностный зазор $S_{max\ вер}$ равен соответственно 0,26 и 0,33 мм, максимальный вероятностный натяг $N_{max\ вер}$ равен соответственно 0,19 и 0,22 мм.

Полученные значения соответствуют требованиям по величине натяга 0,1 – 0,3 мм не в полной мере. Видим, что на малых толщинах шипов (2 мм) рекомендованные ранее параметры ширины проушины и шага шипов по [146, 190, 201], соответствующие $k13$ или равные $\pm 0,12$ мм, не позволяют выполнить рекомендации по натягу 0,1 – 0,3 мм для шипового соединения на многократный прямой шип из-за величин вероятностных зазоров. Решение размерных цепей на основе требований к допускам осей отверстий в соответствии с ГОСТ 6449.4 дает более адекватные результаты.

2.4.2.2 Разработка требований к точности и конструктивным параметрам соединений и пуансонов.

Таким образом, необходимо установить требуемую посадку для соединения шип-проушина и решить прямую задачу по определению параметров шага шипов.

Решение этой задачи для толщины шипа 2 мм на основе формул, приведенных в [69], с учетом требований по обеспечению натяга, равного 0,1 – 0,3 мм, привело к следующим заключениям. Полученная величина допуска на толщину шипа 0,14 мм соответствует 13 качеству. Посадку с натягом в указанных пределах обеспечивают поля допусков $k13$ и $za13$ (с учетом поля допуска для проушины H13).

Далее по описанной выше методике рассчитали размерные цепи (рисунок 2.33) и определили отклонения для шага шипов, которые по итогам расчетов соответствуют полям допусков $k14$ и $za14$.

Полученные результаты позволяют планировать размерные характеристики соединений с шипами толщиной 2 мм, а также проектировать параметры рабочих частей пуансонов. Расчеты для других толщин шипов нужно также проводить по использованной методике.

2.5 Выводы

2.5.1 Процессы деформирования древесины сосны, березы и дуба при внедрении призматического пуансона вдоль волокон в основном схожи. Они включают два этапа: упругая деформация древесины до $\varepsilon = 0,08$ и пластическая деформация $\varepsilon \geq 0,08$ при величине напряжений $\sigma_2 = 60$ МПа для сосны, $\sigma_2 = 66$ МПа для березы, $\sigma_2 = 90$ МПа для дуба.

При внедрении призматического пуансона в древесину исследованных пород происходит сдвиг и сжатие древесины вдоль волокон, формирование под проушиной «пробки» из пластически деформированной древесины высотой, соразмерной или меньшей глубины проушины: $h_d \leq h_n$. Упругое восстановление «пробки» не превышает 6 %. «Пробку» из спрессованной древесины можно рассматривать как более плотное включение в структуру по типу сучка, незначительно влияющее на общие свойства основного объема древесины.

2.5.2 Выполнение следующих граничных условий:

- влажность древесины от 5 до 18 %;
- наклон волокон не более 15 % для образцов из древесины сосны и не более 10 % для образцов и древесины березы и дуба;
- наличие бокового обжима заготовок в процессе прессования с усилием от 300 до 1 кН для образцов из древесины сосны, от 400 до 1,2 кН для березы и дуба в зависимости от ширины формируемых проушин;
- глубина внедрения пуансона до двух с половиной ширин проушины ($h_n > 2,5 B$);

обеспечивает формирование качественных рельефных отпечатков в виде прямоугольных проушин с четкими контурами, соответствующими форме и размерам рабочей части пуансона, с отклонениями не более + 0,142 мм, с уплотненным дном с закрытыми порами, с шероховатостью с высотой наибольших неровностей в пределах 43 – 86 мкм.

2.5.3 Получены аналитические модели, позволяющие определить влияние характеристик древесины и параметров режима прессования на величину усилия и пластической деформации. Анализ полученных моделей показывает, что основными факторами, влияющими на процесс холодного статического прессования проушин в заготовках одной породы, являются влажность древесины и размеры проушины.

2.5.4 Прочностной конечно-элементный анализ, проведенный на примере формирования однократной и многократной прямоугольных проушин, подтверждает возможность получения качественной проушины в древесине без разрушения зон, прилегающих к боковым граням шипов. Подтверждена возможность применения для изготовления пуансона такого распространенного и доступного материала, как сталь СтЗсп.

2.5.5 Рекомендуемые в настоящее время посадки не в полной мере соответствуют требованиям стандартов по величине натягов в соединениях шип-проушина по толщине шипа. Требования к толщине шва и натягу находятся в противоречии друг к другу. Необходимо уточнение требований к соединениям в регламентирующих документах в части рекомендаций по выбору посадок, допуска шага шипов, а также величине натягов с учетом диапазона размеров шипа по толщине.

Предпочтительными посадками для прямоугольных шипов малых толщин (2 мм): являются $H13/k13$ и $H13/za13$. Допуск шага шипов может быть установлен по полю допуска $k14$ и $za14$.

Полученные результаты позволяют планировать размерные характеристики соединений с шипами малых толщин, а также проектировать параметры рабочих частей пуансонов.

3 ОБЩИЕ МЕТОДИЧЕСКИЕ ПОЛОЖЕНИЯ ПРОВЕДЕНИЯ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ИССЛЕДОВАНИЙ

В разделе представлены общие методические положения проведения экспериментальных исследований, характеристики исследуемых материалов и применяемого оборудования, методика планирования экспериментов и обработки экспериментальных данных. В связи с тем, что поисковые экспериментальные исследования на стадии обоснования закономерностей формирования шиповых соединений являются логическими составляющими раздела 2, их результаты представлены выше в соответствующих подразделах.

Представленные в разделе методики исследований прошли апробацию и опубликованы автором в работах [117, 119, 202, 206, 207, 209, 213, 217, 218, 225, 227, 230, 371].

3.1 Программа исследований

На основании задач исследований, представленных в разделе 1, с учетом результатов анализа проведенных ранее исследований в области прессования, склеивания, формирования шиповых соединений заготовок из древесины и выполненного в разделе 2 теоретического обоснования закономерностей формирования шиповых соединений на основе технологии торцового прессования разработана программа экспериментальных исследований. В программу вошли 13 этапов исследований, сгруппированных в три последовательно выполненных блока (рисунок 3.1).

В блок 1 включены четыре этапа исследования, позволяющих обосновать возможность применения процесса местного торцового прессования для формирования качественных рельефных отпечатков в форме прямоугольных проушин в заготовках из древесины различных пород:



Рисунок 3.1 – Программа экспериментальных исследований

- этап 1.1: исследование стадий процесса деформирования древесины при внедрении призматического пуансона;

- этап 1.2: исследование качественных изменений структуры древесины при внедрении призматического пуансона;

- этап 1.3: определение граничных условий получения качественных рельефных отпечатков в виде проушин;

- этап 1.4: исследование напряженного состояния материала инструмента и заготовок.

Блок 1 явился базой для обоснования закономерностей формирования шиповых соединений и подготовкой к основным экспериментальным исследованиям. В связи с этим результаты исследований, выполненных на этапах 1.1 – 1.4, являются логическими составляющими раздела 2 и представлены выше, в п. 2.1 и 2.2. В настоящем разделе приведена методика исследований, разработанная для блоков 2 и 3.

Блок 2 содержит группу исследований режимов процесса прессования, включая его энергосиловые показатели и качественные характеристики проушин, а также определение рациональных значений технологических параметров.

- этап 2.1: исследование влияния параметров режима прессования оди-
нарных проушин на энергосиловые показатели процесса;

- этап 2.2: исследование влияния параметров режима прессования на
глубину уплотненной зоны;

- этап 2.3: исследование влияния параметров режима прессования на
твердость дна проушины;

- этап 2.4: оценка влияния параметров режима прессования многократ-
ных шипов на энергосиловые показатели процесса.

Этапы 2.1 – 2.4, выполненные с целью исследования режимов процесса прессования элементов шиповых соединений, представлены в разделе 4.

В блок 3 включены этапы исследования, позволяющие оценить каче-
ство полученных шиповых соединений.

- этап 3.1: оценка прочности клеевых соединений на прессованные прямоугольные шипы;
- этап 3.2: оценка точности формирования шипов торцовым прессованием;
- этап 3.3: оценка шероховатости граней проушины;
- этап 3.4: оценка качества макроструктуры пластически деформированной зоны;
- этап 3.5: исследование влияния геометрических характеристик шипов на прочность соединений.

Этапы 3.1 – 3.5, выполненные с целью исследования показателей качества шиповых соединений, представлены в разделе 5.

3.2 Характеристики и свойства исследуемых материалов

Для проведения экспериментальных исследований использовали заготовки из трех типичных пород древесины: хвойной (сосны), лиственной рассеянно-сосудистой (березы), лиственной кольцесосудистой (дуба). Заготовки изготавливали из сухих пиломатериалов смешанной распиловки, изготовленных в средней полосе России. Пиломатериалы раскраивали вдоль волокон на кратные по длине заготовки, которые затем фрезеровали с четырех сторон и раскраивали по длине с одновременной вырезкой дефектов.

Для экспериментальных исследований отбирали заготовки, не содержащие сучков и трещин в зоне прессования и имеющие преимущественно тангенциально ориентированную пласт, с наклоном волокон не более 15 %. Для процесса формирования одинарных проушин использовали заготовки с размерами по толщине S , ширине B_3 и длине L соответственно $25 \times 40 \times 60$ мм (длина заготовок ориентирована вдоль волокон). Заготовки для формирования элементов многократных шипов имели размеры $25 \times 40 \times 160$ мм с отклонениями, не превышающими ± 1 мм.

Заготовки, полученные в результате раскроя пиломатериалов, кондиционировали в помещении при температуре 20 °С и относительной влажности 50% до достижения равновесной влажности. Затем в соответствии с планами экспериментов образцы с требуемой влажностью выше равновесной увлажняли до достижения необходимого значения. Образцы с требуемой влажностью ниже равновесной высушивали в сушильном шкафу ШСП-0,25-60 (НПЛ «Теплоприбор») при температуре 60 °С. Выдержка, кондиционирование и хранение подготовленных образцов с требуемой влажностью до момента испытаний производились в герметичных сосудах. В 1 блоке исследований (рисунок 3.1) использовали образцы с влажностью от 5 до 30 %, во 2 блоке исследований – от 4,7 до 18 %, в 3 блоке исследований – от 4,7 до 9 %.

Влажность древесины образцов измеряли с помощью влагомера Hydromette compact (фирма «Gann GmbH») по методике, приведенной в ГОСТ 16588–91 [51]. За среднее значение влажности образцов принимали среднее арифметическое 3-х замеров.

Показатели физико-механических свойств древесины образцов (таблица 3.1) определяли по стандартным методикам [46, 47, 49, 50]. Данные в таблице 3.1 указаны в пересчете на нормализованную влажность 12 %. Сравнение с нормативными показателями проводилось по приведенным в [275] данным.

Таблица 3.1 – Показатели физико-механических свойств древесины образцов

Порода древесины	Параметр прочности	Предел прочности, МПа	Нормативная величина показателя, МПа	Отношение к нормативному показателю, %
Сосна	Прочность на сжатие вдоль волокон	48,81	46,00	106,11
	Прочность на растяжение вдоль волокон	78,45	109,00	71,97
	Прочность на изгиб	61,18	85,00	71,98
Береза	Прочность на сжатие вдоль волокон	54,25	54,00	100,46
	Прочность на растяжение вдоль волокон	114,98	137,00	83,93

	Прочность на изгиб	92,32	110,00	83,93
Дуб	Прочность на сжатие вдоль волокон	56,79	57,00	99,63
	Прочность на растяжение вдоль волокон	98,75	130,00	75,96
	Прочность на изгиб	86,73	103,00	84,20

3.3 Характеристики применяемого оборудования, установок, приборов, средств измерений

3.3.1 Общая характеристика оборудования для проведения экспериментальных исследований

Перечень основного оборудования, установок и приборов, использованных при проведении экспериментов, приведен в таблице 3.2. Экспериментальное оборудование для формирования проушин в древесине описано в п. 3.2.2. Особенности применения прочего экспериментального оборудования приведены в соответствующих пунктах диссертационной работы.

Таблица 3.2 – Перечень применяемого оборудования, установок и приборов

Наименование	Марка	Назначение
1 Шкаф сушильный	ШСП-0,25-60 (НПЛ «Теплоприбор»)	Сушка образцов
2 Влагомер	Hydromette compact (фирма «Gann GmbH»)	Измерение влажности древесины
3 Штангенциркуль	ШЦ-I-125-0,1 ГОСТ 166-89	Контроль размеров сечения заготовки
4 Пресс гидравлический	П-10 (ЗИМ «Точмашприбор»)	Формирование опытных рельефных отпечатков и прессование элементов шиповых соединений
5 Пресс гидравлический	T61210M (AE&T)	Формирование опытных рельефных отпечатков и прессование элементов шиповых соединений
6 Оснастка специальная прессовая	Нестандартное оборудование	Базирование, фиксация и обжим заготовок в процессе формирования отпечатков в древесине
7 Комплект пуансонов	Нестандартное оборудование	Формирование одинарных и многократных проушин
8 Сканер	HP ScanJet 2380	Получение макрофотографий образцов
9 Установка универсальная вакуумная напылительная	JEE-420 (JEOL)	Подготовка образцов к электронному сканированию структуры путем напыления пленки металла
10 Микроскоп сканирующий (растровый) электронный	JSM-6510 LV (JEOL)	Получение микрофотографий образцов
11 Весы лабораторные электронные	AB-623RCE (ViBRA)	Определение физико-механических характеристик древесины, определение расхода клея
12 Микроскоп двойной	МИС-11	Измерение высоты неровностей профиля поверхности граней проушин и шипов
13 Прибор для измерения твердости	TP 5014	Измерение твердости древесины образцов
14 Машина разрывная	P-5 (ЗИМ)	Определение предела прочности клеевых соединений при растяжении
15 Машина универсальная испытательная	УММ-5 (ЗИМ)	Определение предела прочности клеевых соединений при статическом изгибе
16 Машина разрывная	FM PW 500 (VEB Thuringer Industriewerk Rauenstein)	Определение прочности клеевого соединения на растяжение

3.3.2 Экспериментальное оборудование для формирования проушин

Формирование опытных рельефных отпечатков и прессование элементов шиповых соединений осуществляли в прессах П-10 (ЗИМ «Точмашприбор») (рисунок 3.2 *а*) и Т61210М (АЕ&Т) (рисунок 3.3), дополненных комплектом специально изготовленной оснастки для базирования, фиксации и обжима заготовок (рисунок 3.2 *б*).

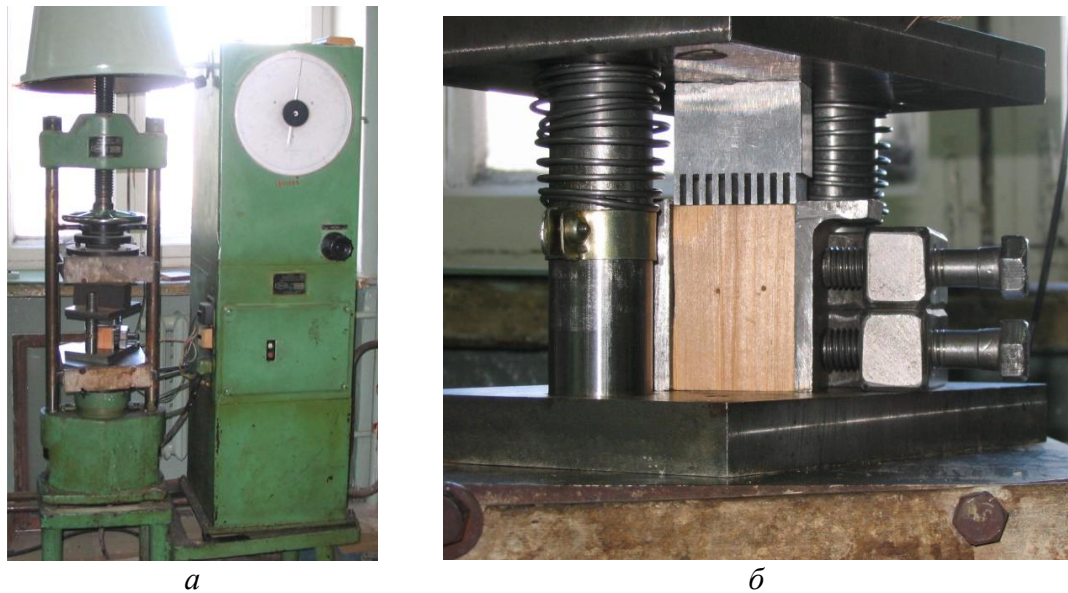


Рисунок 3.2 – Лабораторная установка: *а* – общий вид пресса П-10 с оснасткой; *б* – оснастка для базирования, фиксации и обжима заготовок



Рисунок 3.3 – Общий вид пресса Т61210М (АЕ&Т)

Для формирования проушин использовали пуансоны различных конструкций и типоразмеров (рисунок 3.4) [52, 213].

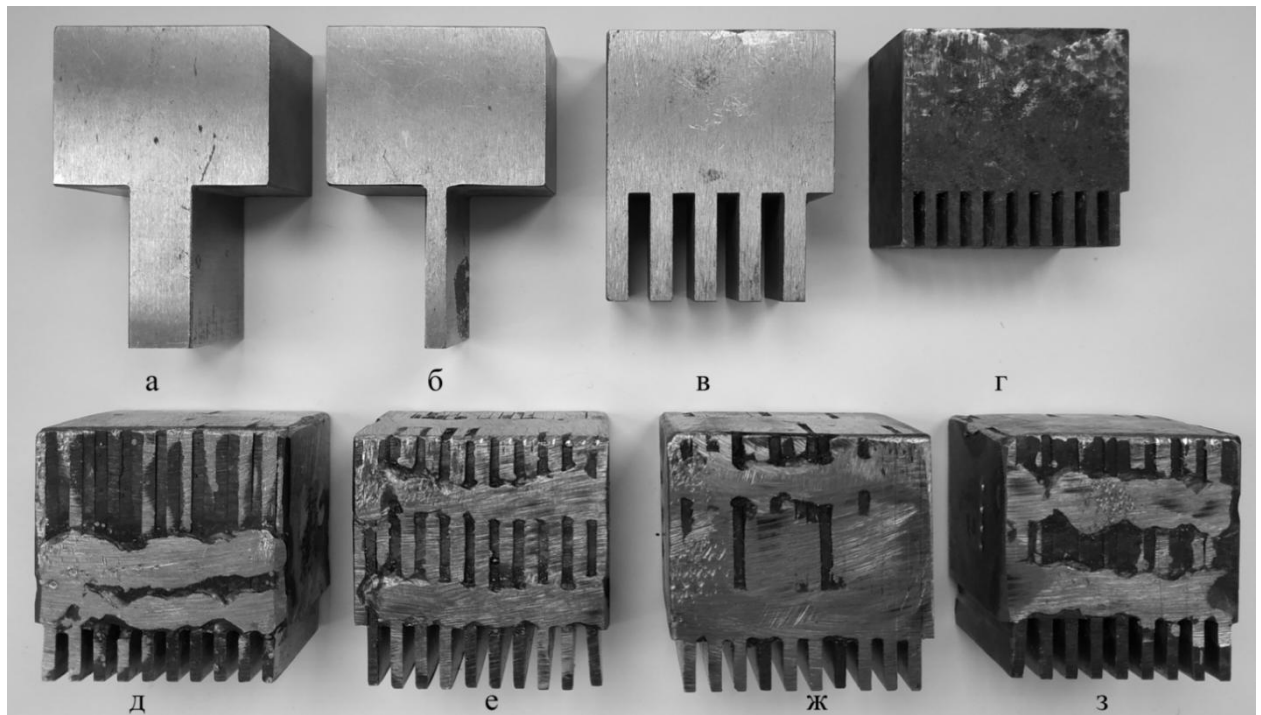


Рисунок 3.4 – Примеры пуансонов различных типоразмеров:

а – 1/12/25; *б* – 1/4/25; *в* – 5/4,2/20/4; *г* – 10/2,2/10/2; *д* – 10/2,2/10/2,1;
е – 10/2,2/10/2,2; *ж* – 10/2,2/10/2,3; *з* – 9/2,2/10/2,4

Инструмент в виде цельнометаллических пуансонов (рисунок 3.4 *а-г*) изготовили из сортового проката по ГОСТ 2591-2006 из стали инструментальной легированной 9ХФ. Инструмент в виде пуансонов, набранных из комплекта пластин и соединенных с помощью сварки (рисунок 3.4 *д-з*), изготовили из листового проката по ГОСТ 19903-2015 из стали конструкционной углеродистой обыкновенного качества Ст3сп.

Для маркировки пуансонов были приняты обозначения, состоящие из нескольких позиций:

- количество рабочих элементов (равно количеству формируемых проушин);
- толщина рабочих элементов (равна ширине формируемых проушин), мм;

- высота рабочих элементов (максимальная глубина формируемых проушин), мм;
- расстояние между рабочими элементами пуансона (толщина формируемых шипов), мм.

Например, обозначение 10/2,2/10/2,1 расшифровывается следующим образом:

- количество рабочих элементов 10;
- толщина рабочих элементов 2,2 мм;
- высота рабочих элементов 10 мм;
- толщина прокладок (расстояние) между рабочими элементами 2,1 мм.

Цельные пуансоны трех типоразмеров: 1/4/25, 1/12/25, 1/20/25 были изготовлены с предельными отклонениями толщин рабочих частей по полю допуска $h10$. Цельные пуансоны двух типоразмеров: 5/4,2/20/4, 10/2,2/10/2 – с предельными отклонениями толщин и шага рабочих частей и по полю допуска $h11$. Сборные пуансоны пяти типоразмеров 10/2,2/12/2,1; 10/2,2/12/2,2; 10/2,2/12/2,3; 9/2,2/12/2,4; 9/2,3/10/2,3 – с предельными отклонениями толщин и шага рабочих частей по полю допуска $k11$.

3.4 Методика экспериментальных исследований

3.4.1 Определение усилия прессования прямоугольных проушин

Для определения усилия прессования проушин производили обработку заготовок на лабораторных установках (рисунки 3.2 а, 3.3).

Режимы прессования устанавливали в соответствии с результатами поисковых экспериментов, отраженными в работах [121, 126, 228] и в п. 2.1 – 2.3. Перед прессованием заготовки базировали, фиксировали и обжимали со стороны кромок в оснастке (рисунок 3.2 б) с целью минимизации риска возникновения трещин при внедрении пуансона. Величина усилия двухстороннего обжима составила 0,8 – 1 кН для образцов из древесины сосны и 0,9 –

1,2 кН для образцов из древесины березы и дуба. Скорость прессования устанавливали в пределах 2 – 4 мм/с. Обработку проводили при относительной влажности $W_{отн} = (65 \pm 15) \%$ и температуре окружающей среды $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Влажность заготовок варьировалась в соответствии с планом экспериментов (п. 3.5).

Проушины формировали на торцовой поверхности образцов путем внедрения пуансона вдоль волокон древесины по схеме, приведенной на рисунке 2.5.

Использовали пуансоны двух видов:

- для определения усилия прессования одинарных проушин – пуансоны с одинарным рабочим элементом призматической формы, типоразмеров 1/4/25, 1/12/25, 1/20/25 (п. 3.3.2, рисунок 3.4 а, б);

- для определения усилия прессования многократных проушин – пуансоны с многократными рабочими элементами, типоразмеров 10/2,2/12/2,1; 10/2,2/12/2,2; 10/2,2/12/2,3; 9/2,2/12/2,4 (п. 3.3.2, рисунок 3.4 в-з).

Глубину внедрения пуансонов при формировании одинарных проушин регулировали в соответствии с планом экспериментов (п. 3.5) путем установки в прессовую оснастку стопоров необходимых размеров.

Усилие прессования одинарных и многократных проушин определяли по измерительным шкалам лабораторных установок.

3.4.2 Исследования анатомической структуры деформированных участков древесины

Анатомическую структуру деформированных участков древесины исследовали методом сканирующей электронной микроскопии (далее – СЭМ) на микроскопе JSM-6510 LV (JEOL). Для этого прессованные образцы подвергали предварительной обработке. Сначала были получены поверхности среза (тангенциальная поверхность) и скалывания (радиальная поверхность) в уплотненной зоне (рисунок 3.5 а). Поверхность среза располагалась на фре-

зерообразной пласти образца, а поверхность скалывания была получена путем раскалывания образца вдоль волокон на границе прессованной и непрессованной зон, по грани проушины.

Из прессованной заготовки извлекали малый образец сечением приблизительно 3×3 мм (обозначен стрелкой на рисунке 3.5 б). Затем на его поверхности производили вакуумное напыление платины на установке JEE-420 (JEOL). Далее получали изображения микроструктуры древесины в виде фотографий. Изображения были изучены и проанализированы с учетом их масштаба.

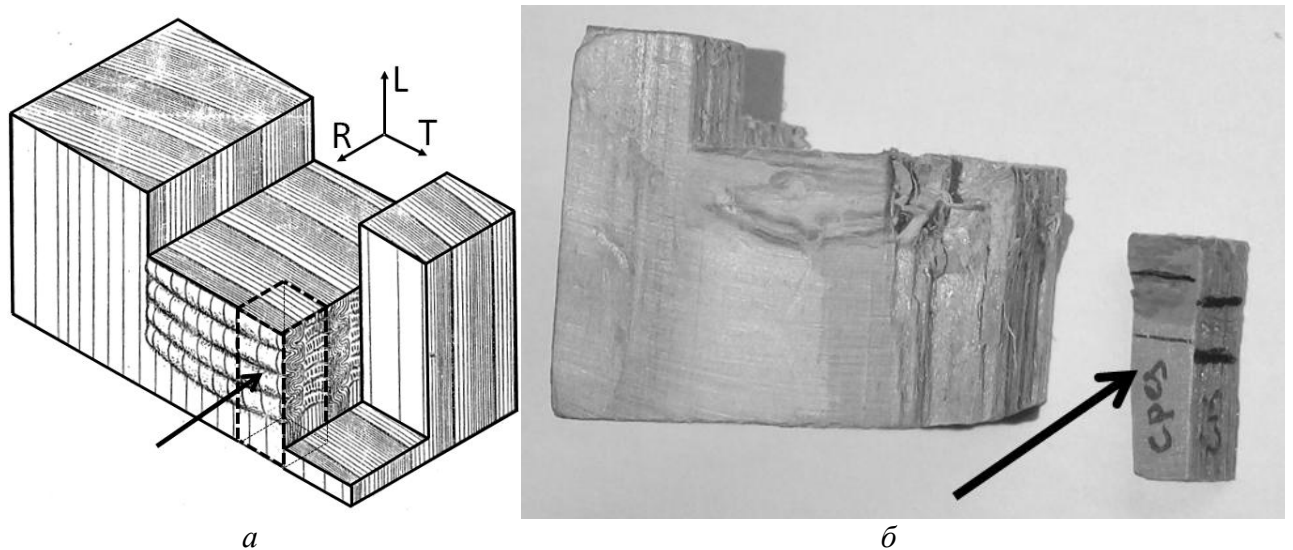


Рисунок 3.5 – Схема получения образца для СЭМ: *а* – расположение образца в прессованной заготовке; *б* – фото образца, извлеченного из прессованной заготовки, стрелкой отмечен образец для СЭМ

Для исследования этапов процесса формирования проушин (п. 2.1.2) прессование осуществляли поэтапно, при постоянном давлении для идентичных образцов. Режимы прессования устанавливали аналогично приведенным в п. 3.4.1. Например, усилие прессования составляло приблизительно 17,8 кН для образцов с проушиной шириной 12 мм и влажностью 18 %. После каждого этапа давление снимали, образец извлекали из оснастки. Исследуемую поверхность шлифовали для лучшего выявления структуры и сканировали с разрешением 600×600 dpi на сканере HP ScanJet 2380. Таким образом полу-

чали ряд изображений каждого образца с последовательным увеличением глубины проушины. Далее изображения анализировали путем сравнения изменений макроструктуры древесины.

3.4.3 Определение относительной глубины уплотненной зоны

Для измерений использовали образцы с одинарными проушинами различных ширин и глубин, полученные в результате прессовой обработки, описанной в п. 3.4.1. Образцы после обработки высушивали в сушильном шкафу ШСП-0,25-60 при температуре 40 °С до влажности 8 %. Затем получали цифровые фотографии образцов с помощью сканера HP ScanJet 2380 с разрешением 600×600 dpi. В приложении Microsoft Visio на изображения накладывали масштабную размерную сетку, с помощью которой измеряли глубину проушины h_n и размер деформированной зоны h_d под проушиной (рисунок 3.6). Нижнюю границу деформированной зоны h_d определяли путем проведения линии, параллельной дну проушины, через наиболее выступающие участки видимых изменений в структуре древесины.

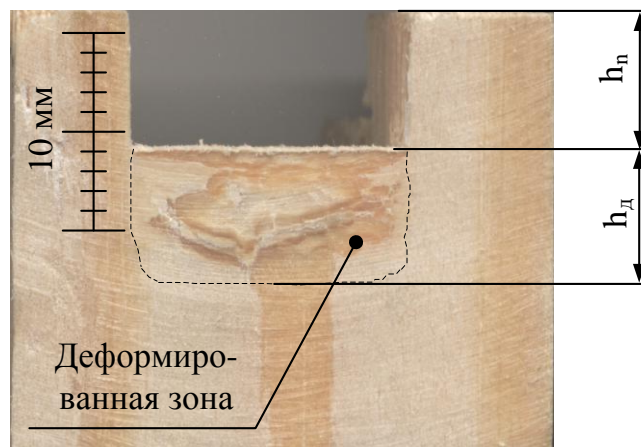


Рисунок 3.6 – Схема измерения глубины деформированной зоны

Для оценки размеров деформированного участка предложен показатель «относительная глубина деформированной зоны» h_3 , %, величину которого рассчитывали по формуле:

$$h_3 = \frac{h_d}{h_n} \cdot 100, \quad (3.1)$$

где h_n – глубина проушины, мм;

h_d – размер деформированной зоны под проушиной, мм.

3.4.4 Определение твердости дна проушины

В деревообработке используют методы измерения статической твердости древесины, основанные на измерении нагрузки при внедрении в поверхность древесины стальных инденторов с полусферическими наконечниками (стальных шариков) различных диаметров [48, 275]. Для испытаний по ГОСТ 16483.17 используют пуансон с полусферическим наконечником с радиусом 5,64 мм, который вдавливается в древесину на глубину 5,64 мм. Этот метод не подходит для испытаний на твердость древесины исследуемых образцов с малой шириной проушин, равной 4 мм. Другой метод, представленный в работе [275], предназначен либо для определения микротвердости древесины в разных зонах годичных слоев (радиус шарика 60 мкм). В связи с этим в работе предложено измерять твердость дна проушин по методу Роквелла, основанном на измерении глубины проникновения индентора в материал.

Измерения проводили на приборе ТР 5014, предназначенном для измерения твердости по методу Роквелла различных материалов, включая фанеру и прессованную древесину. Требования к процедуре измерения устанавливали по аналогии с ГОСТ 9013-59 [72] с учетом основных требований ГОСТ 16483.17 [48] к образцам.

Определение твердости проводили на образцах с одинарными проушинами различных ширин и глубин, полученных в результате прессовой обработки, описанной в п. 3.4.1 и высушенных до влажности 8 %. Для обеспечения доступа испытательного наконечника в зону замера твердости образцы обрабатывали в соответствии с рисунком 3.7, срезая боковые стенки проушин.

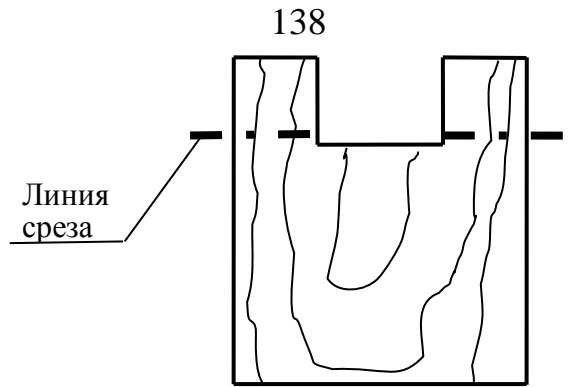


Рисунок 3.7 – Схема подготовки образцов к измерению твердости

Шкалы твердости и соответствующие ей нагрузки были выбраны по паспорту прибора TP 5014 с учетом вида испытываемого материала и его ориентировочной твердости:

- для образцов из древесины сосны – шкала L (число твердости HRL); вид наконечника – стальной шарик диаметром 6,35 мм, общая нагрузка – 588,4 Н;

- для образцов из древесины березы и дуба – шкала M (число твердости HRM); вид наконечника – стальной шарик диаметром 6,35 мм, общая нагрузка – 980,7 Н.

К образцам, установленный на столик прибора, прикладывали предварительную нагрузку, равную 98,07 Н для устранения влияния упругой деформации и различной степени шероховатости. После обнуления шкалы прикладывали основную нагрузку и фиксировали показания на отсчетном устройстве. Число твердости вычисляли как среднее арифметическое по результатам трех замеров с погрешностью ± 2 единицы твердости.

Среднее значение статической твердости торцевой поверхности образцов до изготовления проушины на образцах из древесины сосны составило 37 HRL, из древесины березы – 35 HRM, из древесины дуба – 39 HRM.

Для оценки увеличения твердости дна проушины по сравнению с твердостью торца заготовки в работе предложен относительный показатель «увеличение твердости», обозначенный *HRL* (для древесины сосны) и *HRM* (для древесины березы и дуба). Для расчета относительного увеличения твердости

замеряли торцовую твердость образца HRL_t , HRM_t до прессования проушины и твердость дна HRL_d , HRM_d полученной проушины. Увеличение твердости HRL и HRM , %, рассчитывали по формулам (3.2) и (3.3):

$$HRL = \frac{HRL_d - HRL_t}{HRL_t} \cdot 100, \quad (3.2)$$

$$HRM = \frac{HRM_d - HRM_t}{HRM_t} \cdot 100, \quad (3.3)$$

где HRL_d , HRM_d – твердость дна проушины в образце из древесины сосны и березы (дуба) соответственно;

HRL_t , HRM_t – торцовая твердость образца из древесины сосны и березы (дуба) соответственно.

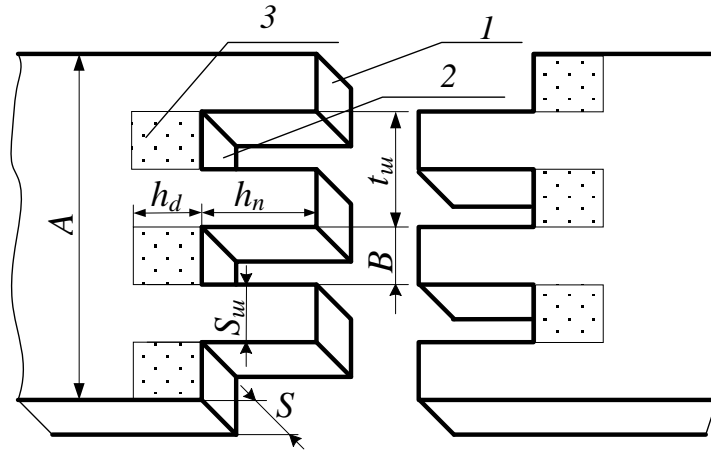
3.4.5 Определение прочности шиповых соединений

Прессование элементов шиповых соединений на торцах заготовок размерами 25×40×160 мм выполнили на лабораторных установках (рисунки 3.2 а, 3.3).

Для целей первоначальной оценки прочности клеевых соединений на прессованные прямоугольные шипы (рисунок 3.1, этап 3.1) использовали пуансоны двух типоразмеров 5/4,2/20/4, 10/2,2/10/2 (рисунок 3.4 в, г). Для целей исследования влияния геометрических характеристик шипов на прочность соединений (рисунок 3.1, этап 3.5) использовали пуансоны 10/2,2/12/2,1; 10/2,2/12/2,2; 10/2,2/12/2,3; 9/2,2/12/2,4 (п. 3.3.2, рисунок 3.4 д-з). Геометрические параметры обработанных прессованием заготовок приведены на рисунке 3.8 и в таблице 3.3.

Склеивание производилось не позднее 6 ч после формирования шипов. Для склеивания шиповых соединений применяли клеи на основе поливинилацетатной дисперсии марок ПВА Супер (ПАО «Акрон») (для этапа 3.1), Момент Столяр (ООО «Хенкель Рус») и Titebond II Premium (Franklin International) (для этапа 3.2). Применяли двухстороннее нанесение клея с рас-

ходом не более 200 г/м^2 . Время открытой выдержки составляло не более 30 с, закрытой – 30 с.



1 – шип; 2 – проушина; 3 – деформированная зона; h_d – глубина деформированной зоны; S – толщина заготовки; A – ширина заготовки; $S_{ш}$ – толщина шипа; h_n – глубина проушины; $t_{ш}$ – шаг шипа; B – ширина проушины

Рисунок 3.8 – Геометрические параметры прессованной заготовки

Таблица 3.3 – Геометрические параметры заготовок

Типоразмер пуансона	$S_{ш}$, мм	B , мм	$t_{ш}$, мм	h_n , мм	Зазор (-) или натяг в соединении, мм
Этап 3.1					
10/2,2/10/2	2	2,2	4,2	10	0,2
5/4,2/20/4	4	4,2	8,2	20	0,2
Этап 3.5					
10/2,2/12/2,1	2,1	2,2	4,3	12	-0,1
10/2,2/12/2,2	2,2	2,2	4,4	12	0,0
10/2,2/12/2,3	2,3	2,2	4,5	12	0,1
9/2,2/12/2,4	2,4	2,2	4,6	12	0,2

Усилие запрессовки устанавливали на уровне не более 5 кН, время выдержки под давлением – 30 с. После склеивания образцы выдерживали не менее 2 суток при $W_{отн} = (65 \pm 15) \%$ и $T = 20 \text{ }^\circ\text{C}$. Форма образцов после склеивания показана на рисунке 3.9.

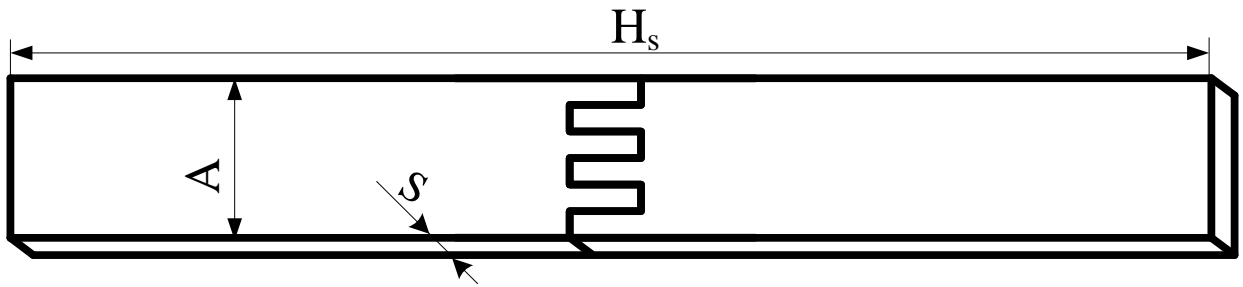


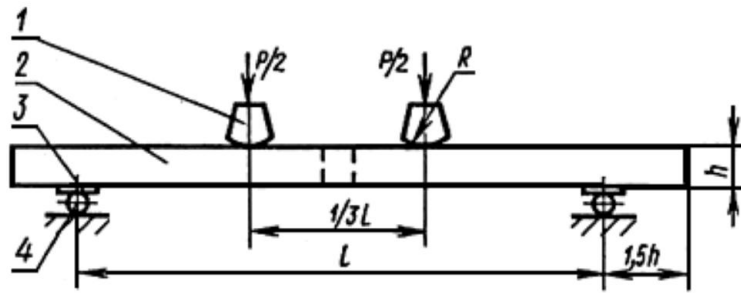
Рисунок 3.9 – Форма заготовок после склеивания

После выдержки заготовки подвергали механической обработке. Образцы для определения предела прочности соединений при изгибе фрезеровали до получения толщины 20 мм в соответствии с п. 1.2.3 ГОСТ 15613.4–78 и ГОСТ 33120–2014 [44, 63]. Образцы для определения предела прочности соединений при растяжении торцевали симметрично с двух сторон для получения длины, равной 300 мм, и раскраивали для получения толщины 8 мм по аналогии с требованиями, приведенным в ГОСТ 15613.5–79 (п. 2.2–2.4) [45].

Предел прочности клеевых соединений при статическом изгибе $\sigma_{p.u}$ определяли с учетом требований ГОСТ 15613.4–78 и ГОСТ 33120–2014 на универсальной испытательной машине УММ-5 (ЗИМ). Скорость приложения нагрузки устанавливали постоянной и равной 10 мм/мин; разрушение происходило через $2,5 \pm 0,5$ мин.

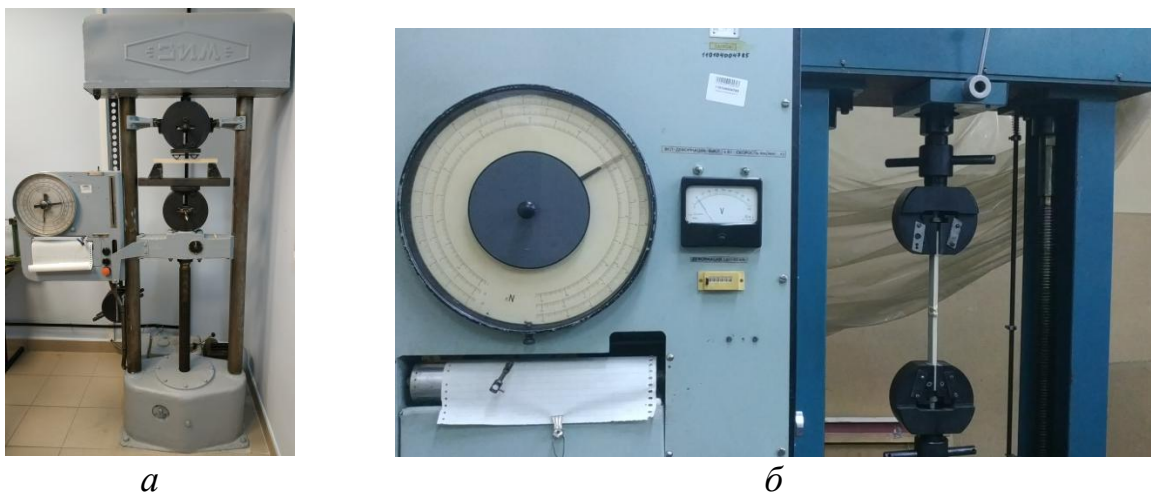
Предел прочности клеевых соединений при растяжении $\sigma_{p.c}$ определяли в соответствии с ГОСТ 15613.5–78 на разрывной машине Р-5 (ЗИМ). Образец непрерывно нагружали со скоростью 10 мм/мин, разрушение происходило через $20,0 \pm 10,0$ с.

Схема испытаний соединений при статическом изгибе приведена на рисунке 3.10, фото процессов испытаний – на рисунке 3.11. Нагрузку, соответствующую разрушению образца, определяли по измерительным шкалам установок. Для измерения реакций, развиваемых в образце во время испытания, и записи диаграммы «нагрузка-деформация» использовали самопишущий прибор, управляемый силоизмерительным механизмом.



1 – нагружающие ножи с $R=(1,5 - 2) h$; 2 – образец;
3 – стальная площадка; 4 – цилиндрический шарнир

Рисунок 3.10 – Схема испытаний соединений при статическом изгибе [44]



a

б

Рисунок 3.11 – Процессы испытания соединений:
a – при статическом изгибе; *б* – при растяжении

Пределы прочности при растяжении σ_{rW} и при изгибе σ_{izW} , МПа, при влажности образцов W определяли по формулам:

$$\sigma_{rW} = \frac{P_{max}^r}{bh_o}, \quad (3.4)$$

$$\sigma_{izW} = \frac{P_{max}^{iz} l}{bh_o^2}, \quad (3.5)$$

где P_{max}^r, P_{max}^{iz} – максимальная разрушающая нагрузка, Н;

l – расстояние между центрами опор, мм;

b – ширина образца, мм;

h_o – толщина образца, мм.

После испытаний контролировали влажность образцов в соответствии с ГОСТ 16588–91 [51], проводя замеры вблизи излома на каждой половине образца. За контрольную величину влажности принимали большее ее значение в одной из половин образца. Значения показателей механических свойств пересчитывали на нормализованную влажность 12 % [275].

Для оценки прочности склеивания предложен показатель «относительная прочность» C , %, величину которого рассчитывали как отношение прочности шипового соединения на растяжение $\sigma_{r.c}$ и изгиб $\sigma_{iz.c}$ к прочности цельной древесины на растяжение $\sigma_{r.d}$ и изгиб $\sigma_{iz.d}$:

$$C_r = \frac{\sigma_{r.c}}{\sigma_{r.d}} \cdot 100, \quad (3.4)$$

$$C_{iz} = \frac{\sigma_{iz.c}}{\sigma_{iz.d}} \cdot 100. \quad (3.5)$$

где C_r – относительная прочность соединения при растяжении, %;

C_{iz} – относительная прочность соединения при статическом изгибе, %.

3.4.6 Оценка точности и качества обработки поверхности прессованных проушин

Оценку точности формирования шипов и измерение шероховатости поверхностей граней проушин и шипов проводили на прессованных образцах с однократными и многократными проушинами.

Точность формирования элементов шиповых соединений оценивали путем сравнения номинальных линейных размеров проушин, соответствующих параметрам используемого пуансона, с размерами полученных проушин. Измерения ширины и глубины проушины, проводили с использованием микроскопа. Полученные значения для определения качества и класса допуска (по терминологии нового стандарта ГОСТ 25346-2013) соотносили с нормами ГОСТ 25346-2013 и ГОСТ 6449.1-82 [58, 69].

Перед проведением измерений высоты неровностей образцы для обеспечения доступа к исследуемым поверхностям граней и дна проушин образцы обрабатывали в соответствии со схемой, представленной на рисунке 3.7. Шероховатость оценивали по параметру $R_{m\ max}$ с учетом требований ГОСТ 15612-2013 [41] и ГОСТ 7016-2013 [71]. Измерения высоты неровностей проводили на микроскопе МИС-11 с использованием методики, предложенной в п. 1.3.3 ГОСТ 15612-85, включая определение отклонения параметров шероховатости от среднего значения по Приложению 7 стандарта [42].

3.4.7 Оценка качества макроструктуры пластически деформированной зоны

Оценку качества макроструктуры деформированной зоны (принятое в работе обозначение – M) проводили для образцов с многократными шипами, полученных по методике, приведенной в п. 3.4.5.

Качество макроструктуры M пластически деформированной зоны оценивали экспертным методом: визуально, по фактическому состоянию образцов и их фотоснимкам, путем сравнения с образцами макроструктуры, принятыми за эталон. Для оценки качества макроструктуры M предложена пятибалльная шкала (таблица 3.4). Эталонные образцы микроструктуры, соответствующие выбранной шкале, назначены для каждой из исследуемых пород. Эталонные образцы макроструктуры древесины сосны и схема их расположения в заготовке приведены на рисунке 3.12.

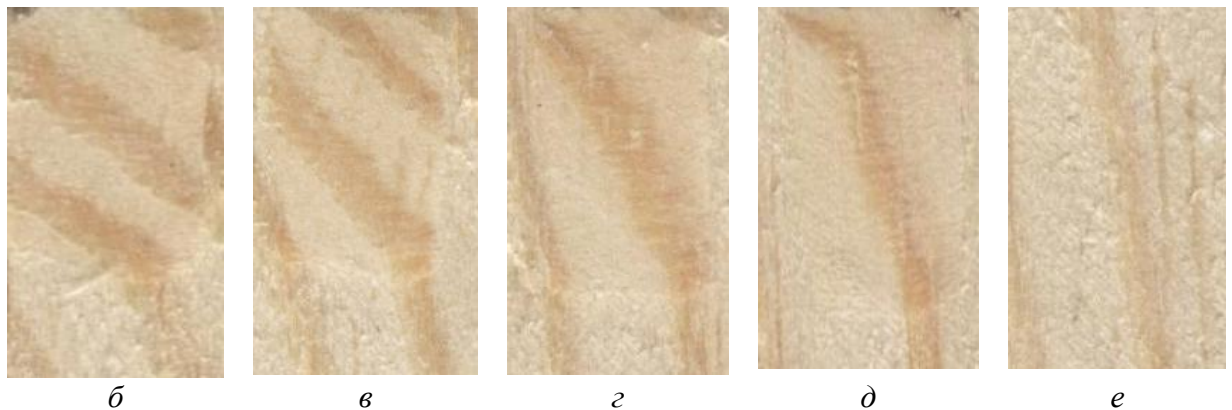
Оценка для каждой заготовки принималась равной баллу, рассчитанному как среднее арифметическое баллов, полученных для всех деформированных зон заготовки, округленное до целочисленного значения.

Таблица 3.4 – Шкала для оценки макроструктуры деформированной зоны

Оценка в баллах	Наименование структуры	Описание структуры	Эталонный образец макроструктуры
1	Дефектная	Значительные изменения направления волокон и тона окраски, границы зоны очерчены достаточно четко	Рисунок 3.10 б
2	Неудовлетворительная	Значительное изменение направления волокон и легкое изменение тона окраски, границы зоны очерчены нечетко	Рисунок 3.10 в
3	Удовлетворительная	Заметное изменение направления волокон и малозаметное изменение тона окраски	Рисунок 3.10 г
4	Хорошая	Малозаметное изменение направления волокон, отсутствие изменений окраски	Рисунок 3.10 д
5	Отличная	Отсутствие видимых невооруженным глазом изменений	Рисунок 3.10 е



а



б

в

г

д

е

Рисунок 3.12 – Образцы макроструктуры древесины сосны:

а – участок расположения деформированной зоны; б, в, г, д, е – образцы макроструктуры, соответствующей 1, 2, 3, 4, 5 баллам

3.5 Методика планирования экспериментов и анализа экспериментальных данных

3.5.1 Методика планирования экспериментов

Исследования, реализуемые с целью получения математических моделей процессов формирования и показателей свойств шиповых соединений проводили по общей схеме:

1) определение физико-механических характеристик древесины образцов: влажности, твердости торцевой поверхности, прочности при сжатии, растяжении вдоль волокон, статическом изгибе;

2) проведение предварительных, поисковых экспериментов для установления диапазона варьирования факторов;

3) планирование и реализация экспериментов с целью получения математических моделей взаимосвязи между исходными факторами процесса x_i и откликами y_i ;

4) обработка результатов экспериментов на основе методов математической статистики с целью определения зависимостей откликов y_i от исходных факторов процесса x_i .

На стадии поисковых экспериментов (этапах 1.1 – 1.3) и этапах 3.1 – 3.3 (рисунок 3.1), проводили классические эксперименты с целью установления характера зависимости выходных параметров от отдельных управляющих факторов.

На следующих стадиях исследования в основном применяли статистические методы планирования эксперимента [242]. Изучаемые процессы и показатели являются многофакторными, а указанные методы позволяют получать модели многофакторных процессов при минимальном числе опытов [165, 232, 242].

Так, постановку экспериментов на этапах 2.1 – 2.3 (рисунок 3.1) осуществляли по полному факторному плану (далее – ПФЭ) типа 2^k для образ-

цов из древесины березы и дуба; для образцов из древесины сосны – по не- композиционному плану второго порядка (далее – НПВП) для трех факторов (плану Бокса-Бенкена) [242]. Методика планирования описана в пп. 3.5.1.1 – 3.5.1.3. Обработку результатов проводили путем расчетов по методикам, приведенным в п. 3.5.2, с использованием программного пакета Microsoft Excel [243]. Машинную проверку полученных результатов провели в программном пакете Statistica [106]. Для построения графиков использовали средства визуализации Microsoft Excel и Statistica.

Для обработки данных, полученных на этапах 2.4. и 3.5 (рисунок 3.1), использовали методы множественного регрессионного анализа, реализованные в Statistica [17-19, 106, 285, 286]. План анализа приведен в п. 3.5.2.4. Для исследования взаимосвязи данных, полученных на этапе 3.1 (рисунок 3.1), применяли методику ANOVA на базе программного пакета Statistica [106, 285, 286]. План статистического анализа приведен в п. 3.5.2.5.

Общие подходы к планированию и реализации экспериментальных исследований сведены в таблицу 3.5.

Таблица 3.5 – Подходы к планированию и реализации экспериментальных исследований

Этап	Содержание этапа	Метод исследования, тип эксперимента и (или) вид анализа данных	Назначение эксперимента и анализа данных	Программное обеспечение
1.1	Исследование стадий процесса деформирования древесины при внедрении призматического пуансона	Классический эксперимент; наблюдение, сравнение	Поисковый	Microsoft Visio
1.2	Исследование качественных изменений структуры древесины при внедрении призматического пуансона	Классический эксперимент; наблюдение, сравнение, анализ	Поисковый	Microsoft Visio
1.3	Определение граничных условий получения качественных проушин	Классический эксперимент; наблюдение, сравнение, анализ, индукция	Поисковый	Microsoft Visio
1.4	Исследование напряженного состояния материала инструмента и заготовок	Конечно-элементное моделирование	Поисковый	КОМПАС-3D
2.1	Исследование влияния параметров режима прессования одинарных проушин на энергосиловые показатели процесса:	- Планируемый многофакторный эксперимент; - дисперсионный анализ; - регрессионный анализ	Получение математической модели	- Microsoft Excel; - Statistica
	- для образцов из древесины сосны	ПФЭ 2^3	Получение модели в виде полинома первой степени	
		НПВП 3^{3-1}	Получение модели в виде полинома второго порядка	
	- для образцов из древесины березы и дуба	ПФЭ 2^3	Получение модели в виде полинома первой степени	
2.2	Исследование влияния параметров режима прессования на глубину уплотненной зоны	- Планируемый многофакторный эксперимент; - дисперсионный анализ; - регрессионный анализ	Получение математической модели	- Microsoft Excel; - Statistica
	- для образцов из древесины сосны	ПФЭ 2^3	Получение модели в виде полинома первой степени	
		НПВП 3^{3-1}	Получение модели в виде полинома второго порядка	

Этап	Содержание этапа	Метод исследования, тип эксперимента и (или) вид анализа данных	Назначение эксперимента и анализа данных	Программное обеспечение
	- для образцов из древесины березы и дуба	ПФЭ 2 ³	Получение модели в виде полинома первой степени	
2.3	Исследование влияния параметров режима прессования на твердость дна проушины	- Планируемый многофакторный эксперимент; - дисперсионный анализ; - регрессионный анализ	Получение математической модели	- Microsoft Excel; - Statistica
	- для образцов из древесины сосны	ПФЭ 2 ³	Получение модели в виде полинома первой степени	
		НПВП 3 ³⁻¹	Получение модели в виде полинома второго порядка	
	- для образцов из древесины березы и дуба	ПФЭ 2 ³	Получение модели в виде полинома первой степени	
2.4	Оценка влияния параметров режима прессования многократных шипов на энергосиловые показатели процесса	- Корреляционный анализ; - регрессионный линейный анализ; - регрессионный нелинейный анализ	Получение математической модели в виде уравнения регрессии	Statistica
3.1	Исследование точности формирования шипов торцовым прессованием	Классический эксперимент; описательный анализ	Получение оценочных данных	-
3.2	Оценка шероховатости граней проушины	Классический эксперимент; описательный анализ	Получение оценочных данных	-
3.3	Оценка качества макроструктуры пластически деформированной зоны	Классический эксперимент; описательный анализ	Получение оценочных данных	Microsoft Excel, Microsoft Visio
3.4	Оценка прочности клеевых соединений на прессованные прямоугольные шипы	Дисперсионный анализ (ANOVA)	Сравнительная оценка средних значений показателей нескольких групп	Statistica
3.5	Исследование влияния геометрических характеристик шипов на прочность соединений	- Корреляционный анализ; - регрессионный линейный анализ; - регрессионный нелинейный анализ	Получение математической модели в виде уравнения регрессии	Statistica

3.5.1.1 Функции отклика, описывающие многофакторные системы, имеют вид:

$$\eta = f(x_1, x_2, \dots, x_k), \quad (3.6)$$

где x_1, x_2, \dots, x_k – независимые переменные факторы.

При отсутствии априорной информации о порядке полинома модель процесса подбирают, начиная с простейших линейных уравнений [242]. В части случаев удается ограничиться линейным приближением и аппроксимировать функцию отклика адекватной моделью в виде полинома первой степени. Получение линейной модели при реализации плана первого порядка [242] предусматривает варьирование факторов на двух уровнях, что упрощает и удешевляет эксперимент. При неадекватности линейной модели увеличивают количество уровней варьирования факторов и реализуют план второго порядка. Это позволяет получить полином второго порядка, который во многих случаях достаточно адекватно описывает процесс [242]. Порядок модели до реализации эксперимента был неизвестен, поэтому применяли последовательное планирование эксперимента, описанное ниже в п. 3.5.1.2 и 3.5.1.3.

3.5.1.2 На первом этапе проводили проверку гипотезы о линейности модели. Реализовали эксперимент, необходимый для определения ее параметров. Проверили адекватность линейной модели, и если она неадекватна, то выдвигали гипотезу о значимом влиянии взаимодействия факторов, сначала парных, затем тройных и т.д.:

$$Y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1, j \neq i}^k b_{ij} x_i x_j. \quad (3.7)$$

Для определения коэффициентов данного уравнения b_0, b_i, b_{ij} достаточно реализовать полный факторный эксперимент (далее – ПФЭ) типа 2^k , где k – число факторов. При двух уровнях каждого фактора (+1, -1) число опытов ПФЭ составляет $N=2^k$, где N – число опытов. Матрица плана эксперимента представлена в таблице 3.5. Такие матрицы обладают свойствами симметричности, нормированности, ортогональности, что обеспечивает качество

модели [232]. Для исключения систематических ошибок использовали рандомизацию – проводили опыты в случайной последовательности, выбранной с помощью таблицы случайных чисел [242].

Таблица 3.5 – Матрица планирования ПФЭ типа 2^3

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	$x_1x_2x_3$	y_i
1	1	-1	-1	1	1	-1	-1	1	y_{i1}
2	1	1	-1	1	-1	1	-1	-1	y_{i2}
3	1	-1	1	1	-1	-1	1	-1	y_{i3}
4	1	1	1	1	1	1	1	1	y_{i4}
5	1	-1	-1	-1	1	1	1	-1	y_{i5}
6	1	1	-1	-1	-1	-1	1	1	y_{i6}
7	1	-1	1	-1	-1	1	-1	1	y_{i7}
8	1	1	1	-1	1	-1	-1	-1	y_{i8}

После вычисления параметров модели (3.6) проводили проверку ее адекватности.

3.5.1.3 В случае неадекватности модели (3.6) выполненные ранее опыты дополняли новой серией, позволяющей вычислить коэффициенты b_{ii} квадратичной модели:

$$y = b_0 + \sum_{i=1}^k b_i x_i + \sum_{i=1}^k b_{(i-1)i} x_{(i-1)} x_i + \sum_{i=1}^k b_{ii} x_i^2 + \dots, \quad (3.8)$$

где y – выборочная оценка функции отклика.

Квадратичную модель (3.7) позволяет получить план Бокса-Бенкена – некомпозиционный план второго порядка (НПВП), который для трех факторов представляет собой выборку строк из полного факторного эксперимента типа 3^k . В этом плане каждая переменная варьируется на трех уровнях (+1, 0, -1) [232, 242]. Матрица плана эксперимента представлена в таблице 3.6. Опытты проводятся в случайной последовательности.

Таблица 3.6 – Матрица НПВП для трех факторов (выборка из плана типа 3³)

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	x_1x_2	x_1x_3	x_2x_3	x_1^2	x_2^2	x_3^2	y_i
1	1	1	1	0	1	0	0	1	1	0	y_{i1}
2	1	1	-1	0	-1	0	0	1	1	0	y_{i2}
3	1	-1	1	0	-1	0	0	1	1	0	y_{i3}
4	1	-1	-1	0	1	0	0	1	1	0	y_{i4}
5	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	y_{i5}
6	1	1	0	1	0	1	0	1	0	1	y_{i6}
7	1	1	0	-1	0	-1	0	1	0	1	y_{i7}
8	1	-1	0	1	0	-1	0	1	0	1	y_{i8}
9	1	-1	0	-1	0	1	0	1	0	1	y_{i9}
10	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	y_{i10}
11	1	0	1	1	0	0	1	0	1	1	y_{i11}
12	1	0	1	-1	0	0	-1	0	1	1	y_{i12}
13	1	0	-1	1	0	0	-1	0	1	1	y_{i13}
14	1	0	-1	-1	0	0	1	0	1	1	y_{i14}
15	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	y_{i15}

3.5.2 Методика статистической обработки и анализа экспериментальных данных

Статистическую обработку и анализ полученных данных проводили с доверительной вероятностью 95 % по приведенным в пп. 3.5.2.1 – 3.5.2.3 зависимостям и приведенным в пп. 3.5.2.4 и 3.5.2.5 планам с использованием программных пакетов Microsoft Excel и Statistica.

3.5.2.1 Математическую обработку экспериментальных данных, полученных в результате эксперимента типа ПФЭ 2³ с равномерным дублированием опытов (этап 2.3 (рисунок 3.1)), проводили по следующей схеме [180, 232, 242, 232].

1) Вычисление среднего арифметического значения отклика \bar{y}_j для каждой строки матрицы планирования:

$$\bar{y}_j = \frac{1}{n} \sum_{u=1}^n y_{ju}, \quad (3.9)$$

где n – число параллельных опытов;

u – номер параллельного опыта;

y_{ju} – значение функции отклика в центре плана.

2) Вычисление дисперсии s_j^2 опыта по данным n параллельных опытов:

$$s_j^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{u=1}^n (y_{ju} - \bar{y}_j)^2. \quad (3.10)$$

3) Определение среднего квадратического отклонения s_j опыта:

$$s_j = \sqrt{\frac{1}{n-1} \sum_{u=1}^n (y_{ju} - \bar{y}_j)^2}. \quad (3.11)$$

Для проверки измерений на наличие грубых погрешностей использовали критерий Граббса [78].

$$G_{1j} = \frac{|y_{jmax} - \bar{y}_j|}{s_j}, \quad (3.12)$$

$$G_{2j} = \frac{|\bar{y}_j - y_{jmin}|}{s_j}, \quad (3.13)$$

где y_{jmax} – наибольшее значение отклика для строки матрицы планирования;

y_{jmin} – наименьшее значение отклика для строки матрицы планирования.

Полученные значения G_{1j} и G_{2j} сравнивают с теоретическим значением G_T [78] при выбранном уровне значимости. Если $G_{1j} > G_T$ или $G_{2j} > G_T$, то соответствующие значения y_{jmax} , y_{jmin} исключают как маловероятные. Далее процедуру вычисления по формулам (3.9) – (3.13) повторяют. В случае исключения отдельных результатов измерений опыты повторяют в тех же условиях. При необходимости проверяли сомнительные результаты по методике, приведенной в [232], на основе t -критерия Стьюдента.

4) Проверка гипотезы однородности дисперсий s_j^2 опытов с помощью критерия Кохрена – отношения максимальной дисперсии s_{max}^2 (из ряда дисперсий по данным параллельных опытов, т.е. по каждой строке матрицы) к сумме всех дисперсий s_j :

$$G_p = \frac{s_{max}^2}{s_1^2 + s_1^2 + \dots + s_N^2} = \frac{s_{max}^2}{\sum_{j=1}^N s_j^2}. \quad (3.14)$$

Дисперсии однородны, если расчетное значение G_p -критерия не превышает табличного значения G_T [242].

5) Вычисление дисперсии s_y^2 воспроизводимости эксперимента:

$$s_y^2 = \frac{1}{N} \sum_{j=1}^N s_j^2. \quad (3.15)$$

6) Определение коэффициентов уравнения регрессии:

$$y = b_0 + b_1 x_1 + b_2 x_2 + b_3 x_3 + b_{12} x_1 x_2 + b_{13} x_1 x_3 + b_{23} x_2 x_3 + b_{123} x_1 x_2 x_3 \quad (3.16)$$

по следующим по формулам:

- свободный член:

$$b_0 = \frac{\sum_{j=1}^N y_j}{N}; \quad (3.17)$$

- коэффициенты регрессии, характеризующие линейные эффекты:

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^N x_{ij} y_j}{N}; \quad (3.18)$$

- коэффициенты регрессии, характеризующие эффекты взаимодействия:

$$b_{il} = \frac{\sum_{j=1}^N x_{ij} x_{lj} y_j}{N}, \quad (3.19)$$

где i, l – номера опытов,

x_{ij}, x_{lj} – кодированные значения факторов i и l в j -м опыте.

6) Проверка статистической значимости коэффициентов уравнения регрессии путем сравнения абсолютной величины коэффициента с доверительным интервалом (при расчетах, проводимых вручную) и с помощью t -критерия (при расчетах, проводимых с помощью программного обеспечения).

Дисперсия коэффициентов регрессии вычисляется по выражению:

$$s_{b_i}^2 = \frac{I}{nN} s_y^2, \quad (3.20)$$

где $s_{b_i}^2$ – дисперсия i -го коэффициента регрессии.

Доверительный интервал Δb_i определяют по формуле

$$\Delta b_i = \pm t_T s_{b_i}, \quad (3.21)$$

где t_T – табличное значение критерия при принятом уровне значимости 5 % и числе степеней свободы $f=(n-1)N$ [242];

s_{b_i} – ошибка в определении i -го коэффициента регрессии.

Коэффициент регрессии значим, если его абсолютная величина больше доверительного интервала.

При проверке значимости с помощью t -критерия Стьюдента для каждого коэффициента регрессии вычисляется критерий:

$$t_p = \frac{|b_i|}{s_{b_i}} \quad (3.22)$$

и сравнивается с табличным значением t_T . Коэффициент значим, если $t_p > t_T$ для принятого уровня значимости и числа степеней свободы f .

7) Проверка гипотезы об адекватности модели по F -критерию Фишера.

Дисперсию s_a^2 адекватности определяют по формуле:

$$s_{ad}^2 = \frac{n \sum_{j=1}^N (\bar{y}_j - \hat{y}_j)^2}{f}, \quad (3.23)$$

где \bar{y}_j – среднее арифметическое значение отклика в j -м опыте;

\hat{y}_j – значение отклика, вычисленное по модели для условий j -го опыта;

f – число степеней свободы, которое для линейной модели определяется по формуле:

$$f = N - (k + 1), \quad (3.24)$$

где k – число факторов.

F -критерий Фишера определяется по выражению:

$$F_p = \frac{s_{a\theta}^2}{s_y^2}. \quad (3.25)$$

Табличное значение F_T -критерия определяется для принятого уровня значимости (5 %) в зависимости от соответствующих чисел степеней свободы [242]. При выполнении условия $F_p < F_T$ модель адекватна.

Результаты обработки данных приведены в п. 4.2.

3.5.2.2 Математическую обработку экспериментальных данных, полученных в результате эксперимента типа ПФЭ 2^3 при отсутствии дублирования опытов (этапы 2.1, 2.2 (рисунок 3.1)), проводили по следующей схеме [180, 232, 242].

1) Вычисление дисперсии s_y^2 воспроизводимости эксперимента по результатам четырех опытов, поставленных в центре плана (таблица 3.7).

Таблица 3.7 – Матрица планирования эксперимента в центре плана для ПФЭ типа 2^3

Номер опыта	x_0	x_1	x_2	x_3	y_u
9	1	0	0	0	y_{u1}
10	1	0	0	0	y_{u2}
11	1	0	0	0	y_{u3}
12	1	0	0	0	y_{u4}

Среднее арифметическое значение отклика \bar{y} в центре плана:

$$\bar{y} = \frac{\sum_{u=1}^{n_0} y_u}{n_0}, \quad (3.26)$$

где n_0 – число параллельных опытов в центре плана;

u – номер параллельного опыта в центре плана;

y_u – значение функции отклика в центре плана.

Дисперсия s_y^2 воспроизводимости эксперимента:

$$s_y^2 = \frac{I}{n_0 - I} \sum_{u=1}^{n_0} (y_u - \bar{y})^2. \quad (3.27)$$

2) Определение коэффициентов уравнения регрессии по следующим формулам:

- свободный член:

$$b_0 = \frac{\sum_{j=1}^N y_j}{N}; \quad (3.28)$$

- коэффициенты регрессии, характеризующие линейные эффекты:

$$b_i = \frac{\sum_{j=1}^N x_{ij} y_j}{N}; \quad (3.29)$$

- коэффициенты регрессии, характеризующие эффекты взаимодействия:

$$b_{il} = \frac{\sum_{j=1}^N x_{ij} x_{lj} y_j}{N}, \quad (3.30)$$

где i, l – номера опытов;

x_{ij}, x_{lj} – кодированные значения факторов i и l в j -м опыте.

3) Проверка статистической значимости коэффициентов уравнения регрессии сравнением абсолютной величины коэффициента с доверительным интервалом (при расчетах, проводимых вручную) и с помощью t -критерия (при расчетах, проводимых с помощью программного обеспечения).

Дисперсия коэффициентов регрессии вычисляется по выражению

$$s_{b_i}^2 = \frac{I}{N} s_y^2, \quad (3.31)$$

где $s_{b_i}^2$ – дисперсия i -го коэффициента регрессии.

Доверительный интервал Δb_i определяют по формуле (3.21). Значение t -критерия определяется в зависимости от принятого уровня значимости (5 %) и числа степеней свободы $f = n_0 - I$ [242]. Коэффициент регрессии значим, если его абсолютная величина больше доверительного интервала.

Для проверки значимости с помощью t -критерия Стьюдента для каждого коэффициента регрессии вычисляется критерий по формуле (3.22) и срав-

нивается с табличным значением t_T . Коэффициент значим, если $t_p > t_T$ для принятого уровня значимости и числа степеней свободы f .

4) Проверка гипотезы об адекватности модели по F -критерию Фишера.

Для вычисления дисперсии s_a^2 адекватности используется формула

$$s_{ad}^2 = \frac{\sum_{j=1}^N (y_j - \hat{y}_j)^2}{f}, \quad (3.32)$$

где y_i – наблюдаемое значение отклика в j -м опыте;

\hat{y}_j – значение отклика, вычисленное по модели для условий j -го опыта;

f – число степеней свободы, которое для линейной модели определяется по формуле (3.24).

F -критерий Фишера определяется по выражению (3.25). Табличное значение F_T -критерия определяется в зависимости от принятого уровня значимости (5 %) и соответствующих чисел степеней свободы (для рассматриваемого плана равных 4 для числителя и 3 для знаменателя) [242]. При выполнении условия $F_p < F_T$ модель адекватна.

Результаты обработки данных приведены в п. 4.1, 4.2.

3.5.2.3 Математическую обработку экспериментальных данных, полученных в результате эксперимента типа НПВП 3^{3-1} , (этапы 2.1-2.3 (рисунок 3.1)) проводили по следующей схеме [180, 232, 242].

Определение коэффициентов уравнения регрессии

$$y = b_0 + b_1x_1 + b_2x_2 + b_3x_3 + b_{11}x_1^2 + b_{22}x_2^2 + b_{33}x_3^2 + b_{12}x_1x_2 + b_{13}x_1x_3 + b_{23}x_2x_3 \quad (3.33)$$

по следующим формулам:

- свободный член:

$$b_0 = \frac{1}{3} \sum_{u=1}^3 y_{0u}; \quad (3.34)$$

- коэффициенты регрессии, характеризующие линейные эффекты:

$$b_i = \frac{1}{8} \sum_{j=1}^{15} x_{ij} y_j; \quad (3.35)$$

- коэффициенты регрессии, характеризующие эффекты взаимодействия:

$$b_{il} = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^{15} x_{ij} x_{lj} y_j ; \quad (3.36)$$

- коэффициенты регрессии, характеризующие квадратичные эффекты:

$$b_{ii} = \frac{1}{4} \sum_{j=1}^{15} x_{ij}^2 y_j - \frac{1}{16} \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^{15} x_{ij}^2 y_j - \frac{1}{6} \sum_{u=1}^3 y_{0u} , \quad (3.37)$$

где u – номер параллельного опыта в центре плана;

y_{0u} – значение функции отклика в u -м опыте;

j – номер опыта в матрице планирования;

i, l – номера факторов;

x_{ij}, x_{lj} – кодированные значения факторов i и l в j -м опыте.

y_j – значение функции отклика в j -м опыте.

Определение дисперсий коэффициентов регрессии по формулам:

$$s_{b0}^2 = \frac{1}{3} s_y^2 , \quad (3.38)$$

$$s_{bi}^2 = \frac{1}{8} s_y^2 , \quad (3.39)$$

$$s_{bil}^2 = \frac{1}{4} s_y^2 , \quad (3.40)$$

$$s_{bii}^2 = \frac{13}{48} s_y^2 . \quad (3.41)$$

Дисперсию s_y^2 воспроизводимости эксперимента определяют по результатам опытов в центре плана:

$$s_y^2 = \frac{s_E}{n_0 - 1} , \quad (3.42)$$

где

$$s_E = \sum_{u=1}^3 (y_{0u} - \bar{y}_0)^2 , \quad (3.43)$$

$$\bar{y}_0 = \frac{1}{3} \sum_{u=1}^3 y_{0u} . \quad (3.44)$$

Адекватность полученной модели проверяли с помощью F-критерия Фишера. Дисперсию $s_{\alpha_0}^2$ адекватности вычисляли по формуле:

$$s_{ad}^2 = \frac{s_R - s_E}{f}, \quad (3.45)$$

$$s_R = \sum_{j=1}^N (y_j - \hat{y}_j)^2, \quad (3.46)$$

где \hat{y}_j – значения функции отклика, вычисленные по модели;

f – число степеней свободы,

$$f = N - k' - (n_0 - 1), \quad (3.47)$$

где k' – число коэффициентов аппроксимирующего полинома.

Результаты обработки данных приведены в п. 4.1, 4.2.

3.5.2.4 Для статистической обработки данных, полученных на этапах 2.4, 3.5 (рисунок 3.1), использовали регрессионный анализ с целью определения степени детерминированности вариации зависимой переменной предикторами [17-19, 106, 285, 286]. План анализа включал следующие этапы:

- поиск мультиколлинеарных факторов;
- анализ остатков и оценка приемлемости модели в целом;
- анализ регрессионного уравнения;
- анализ коэффициента детерминации;
- исключение несущественно влияющих на отклик факторов.

Статистическая обработка экспериментальных данных проведена в программном пакете Statistica [106] с доверительной вероятностью 95 %.

Результаты обработки данных приведены в п. 4.4.

3.5.2.5 Для исследования взаимосвязи данных, полученных на этапе 3.1 (рисунок 3.1), применяли методику ANOVA (дисперсионный анализ, от англ. *ANalysis Of VAriance*), позволяющую сравнивать средние значения нескольких групп [106, 285, 286]. План статистического анализа включал следующие шаги:

- 1) проверка возможности получения обобщенной характеристики прочности, учитывающей данные для всех видов испытаний и типов соединений;

2) разделение данных на группы в соответствии с видом испытания и типом соединения;

3) проверка нормальности распределения данных в группах по методике, приведенной в [374, 375], по критерию Шапиро-Уилка:

$$W = \frac{\left(\sum_{i=1}^k a_{n-i+1} (x_{n-i+1} - x_i) \right)^2}{\sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^2}, \quad (3.48)$$

где x – значения переменных;

a – табличный коэффициент [374, 375];

n – количество переменных;

k – величина, находящаяся по правилу: если n – нечетное, то $k = (n - 1)/2$, если n – четное, то $k = n / 2$;

\bar{x} – среднее арифметическое значение ряда переменных.

4) проверка однородности дисперсий по критерию Левина с использованием методики и соотношений, приведенных в [248];

5) выявление различий между средними значениями прочности в группах по t-критерию Стьюдента при нормальном распределении данных и по критерию Манна–Уитни [302, 345, 346, 356, 389] при ненормальном распределении;

6) определение статистических показателей и средних значений прочности для сгруппированных данных.

Статистическая обработка данных проведена в программном пакете Statistica [106] с доверительной вероятностью 95 %.

Результаты обработки данных приведены в п. 5.4.

3.6 Методика определения рациональных значений параметров режимов торцового прессования

Частный анализ обособленных моделей, описывающих аспекты протекания процесса прессования прямоугольных проушин и их достигаемые характеристики, затрудняет выбор рациональных режимов обработки из-за

наличия конкурирующих требований к процессу, таких как высокое качество обработки при минимальных ресурсных затратах. Эта комплексная задача по нахождению рациональных значений параметров технологических режимов требует поиска компромиссных решений с учетом множества критериев. Такая задача относится к области исследования операций, позволяющей получить приемлемые решения на основе математического моделирования процессов [29, 148, 179, 194]. Нахождение оптимальных и квазиоптимальных значений параметров технологических процессов относится к параметрической оптимизации, входящей в задачи математического программирования [148, 194].

Для одноцелевой оптимизации (поиска экстремумов линейных нелинейных функций с одной или несколькими переменными) разработан ряд достаточно эффективных численных методов: дихотомии, золотого сечения, градиентный; покоординатного поиска, крутого восхождения, штрафных функций, допустимых направлений, симплекс-метод и др. [179]. Для параметрической оптимизации исследуемого процесса необходимо исследовать совокупность моделей (функций). При этом для получения достоверных результатов при проведении процедуры оптимизации математические модели должны адекватно отражать исследуемый процесс [194]. Особенность решения таких многокритериальных задач состоит в том, что они являются многоцелевыми. При конкурирующих целях критерии оптимальности могут противоречить друг другу, и экстремумы каждой из исследуемых функций могут находиться в разных точках исследуемого диапазона [5, 304, 306]. В связи с этим выбор целевой функции – важная и достаточно сложная задача [29, 148].

Процедура решения многокритериальной задачи включает использование механизма выбора наилучшей альтернативы из множества [91]. Для процедур априорного типа [91, 194] сведение многокритериальной задачи к однокритериальной (свертка критериев [194]) может быть осуществлено с помощью различных методов: главной компоненты [194], взвешенной суммы

частных критериев (линейной свертки с использованием весовых коэффициентов) [91, 110, 148, 179], справедливого компромисса [91, 110], последовательных уступок [148, 257], идеальной точки [91] и др. Выбор принципа оптимальности обуславливается структурой конкретной задачи. Для решения поставленной в работе задачи ряд существенных преимуществ имеет принцип справедливого компромисса. В частности, это невозможность компенсации недопустимо малых значений некоторых критериев достаточно большими значениями других [91]. Использование такой сложносоставной целевой функции в виде нелинейного выражения приводит к задаче нелинейного программирования. Поиск ее решений может быть проведен с помощью градиентных методов [110, 179], что успешно реализовано в работах, связанных с исследованием процессов деревопереработки [37, 160, 303, 306].

Постановка задачи оптимизации осуществлена по методикам, принятым в математическом моделировании [148, 194, 257]:

- 1) содержательная постановка задачи, выбор цели оптимизации;
- 2) формализация задачи:
 - а) определение области исследования (выбор управляемых переменных и разработка совокупности адекватных математических моделей, описывающих процесс прессования);
 - б) создание целевой функции и определение ограничений для управляемых переменных;
- 3) исследование математической модели оптимизации.

Для получения математических моделей, описывающих процесс прессования и показатели качества сформированных проушин, использовали методики планирования экспериментов, статистической обработки и анализа экспериментальных данных, описанные в п. 3.5.

Для свертки критериев применили принцип справедливого компромисса [91, 110] с приведением частных критериев к безразмерной форме [194, 179].

Базовое соотношение для разработки целевой функции Y выглядело следующим образом:

$$Y = \frac{\prod_{i=1}^{n-m} y_i}{\prod_{i=n-m+1}^n y_i} \rightarrow \max, \quad (3.49)$$

где y_i – частные критерии;

n – общее количество критериев;

$y_1 \dots y_{n-m}$ – критерии, подлежащие максимизации;

$y_{n-m+1} \dots y_n$ – критерии, подлежащие минимизации.

Частные критерии имели разную размерность, поэтому переходили к безразмерным показателям (нормированным значениям) по формуле

$$y_{in} = \frac{y_i - y_{i \min}}{y_{i \max} - y_{i \min}}, \quad (3.50)$$

где y_{in} – нормированное значение i -го критерия;

y_i – натуральное значение i -го критерия;

$y_{i \min}$ – минимальное значение i -го критерия в диапазоне исследования;

$y_{i \max}$ – максимальное значение i -го критерия в диапазоне исследования.

При этом вклад i -го частного критерия в целевую функцию зависит от того, насколько сильно меняется величина критерия в диапазоне исследования, т.е. весомость каждой составляющей адекватна используемой размерности [91].

Поиск максимальных и минимальных значений частных критериев выполняли по методу обобщенного приведенного градиента (далее – ОПГ) в программном пакете Microsoft Excel с использованием надстройки «Поиск решения» [135, 184, 243]. На основе найденных экстремальных значений получали нормированные значения критериев по формуле (3.49) и целевую функцию (оптимизационную модель) по формуле (3.48).

Оптимизационную модель составляли на основе полученной целевой функции и набора ограничений по критериям. Решение задачи оптимизации проводили по методу ОПГ в программном пакете Microsoft Excel.

Результаты обработки данных приведены в п. 4.3.

4 ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИХ РЕЖИМОВ ПРЕССОВАНИЯ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ПРОУШИН

Внедрение технологии торцового прессования в промышленное производство требует обоснованного выбора режимов, обеспечивающих высокое качество обработки при минимальных ресурсных затратах.

Цель раздела – установить влияние параметров технологических режимов на энергосиловые и качественные показатели процесса прессования проушин.

В разделе представлены результаты:

- экспериментальных исследований влияния параметров технологических режимов на усилие прессования одинарных проушин;
- экспериментальных исследований глубины деформированной зоны и твердости дна проушины;
- решения задачи оптимизации по определению рациональных значений параметров технологических режимов процесса прессования проушин;
- экспериментальной оценки параметров технологических режимов на усилие прессования многократных проушин.

Представленные в разделе результаты исследований прошли апробацию и опубликованы автором в работах [117, 119, 173, 202, 203, 206, 207, 209, 210, 213, 217-219, 224, 225-227, 229, 230, 371].

4.1 Исследование влияния параметров режима прессования одинарных проушин на энергосиловые характеристики процесса

4.1.1 Планирование и постановка экспериментов

В результате исследования закономерностей и теоретического анализа процесса формообразования проушин способом прессования, а также ряда поисковых экспериментальных исследований (раздел 2) установлено, что по-

казатели процесса статического холодного прессования, включая усилие, в заготовках одной породы, одинакового размера сечения, являются функцией от ряда параметров режима: влажности W , ширины B и глубины h_n проушины.

Задача экспериментальных исследований на этапах 2.1 – 2.4 (рисунок 3.1) – получение эмпирических математических моделей, описывающих показатели процесса прессования проушин в виде регрессионных зависимостей выходных параметров от входных факторов (формулы (3.16) и (3.33)).

Постановку экспериментов на этапах 2.1 – 2.3 осуществляли по факторным планам, описанным в п. 3.5.1. В результате проведения эксперимента получали зависимости для каждого из трех выходных параметров: энергосилового показателя (усилия прессования проушин) F_e , а также показателей качества обработки – характеристики увеличения твердости дна проушин HRL (HRM) и глубины деформированной зоны h_3 . Схема описания процесса приведена на рисунке 4.1.

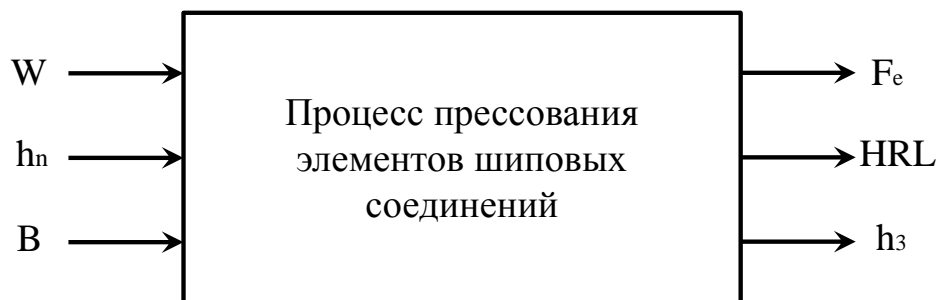


Рисунок 4.1 – Схема описания процесса прессования элементов шиповых соединений

Уровни факторов и интервалы их варьирования выбраны по результатам предварительных поисковых экспериментов. Уровни и интервалы варьирования факторов в натуральных и кодированных значениях приведены в таблице 4.1.

Методические сетки проведения экспериментов приведены в таблицах 4.2 – 4.4. Результаты статистической обработки данных приведены в п. 4.1.2, 4.2.1.

Таблица 4.1 – Уровни и интервалы варьирования факторов

Порода древесины	Факторы	Обозначение	Единица измерения	Кодированное обозначение	Интервалы варьирования	Уровни факторов		
						нижний -1	основной 0	верхний +1
Сосна	Влажность древесины	W	%	x_1	5,0	8,0	13,0	18,0
	Глубина проушины	h_n	мм	x_2	3,0	5,0	8,0	11,0
	Ширина проушины	B	мм	x_3	8,0	4,0	12,0	20,0
Береза	Влажность древесины	W	%	x_1	1,5	6,5	8,0	9,5
	Глубина проушины	h_n	%	x_2	2,0	4,0	6,0	8,0
	Ширина проушины	B	мм	x_3	8,0	4,0	12,0	20,0
Дуб	Влажность древесины	W	мм	x_1	1,0	7,0	8,0	9,0
	Глубина проушины	h_n	%	x_2	1,5	6,0	7,5	9,0
	Ширина проушины	B	мм	x_3	8,0	4,0	12,0	20,0

Таблица 4.2 – Методическая сетка проведения эксперимента типа НПВП 3^{3-1} по определению зависимостей выходных параметров процесса прессования от режимных факторов для заготовок из древесины сосны

Исследуемый процесс	Постоянные факторы		Переменные факторы		Выходной параметр	Количество опытов	Количество повторений опытов	Количество наблюдений в опыте	Общее количество наблюдений
	наименование, единицы измерения	значение	наименование, единицы измерения	значение					
Прессование одинарных проушин	Порода древесины	сосна	Влажность, %	8; 13; 18	Усилие прессования F_e	15	1	1	15
	Наклон волокон, %	≤ 15							
	Ориентация пласти	тангенциальная							
	Размеры заготовки ($S \times B_3 \times L$), мм	25×40×60	Ширина проушины, мм	4; 12; 20	Увеличение твердости дна проушин HRL	15	1	3	45
	Температура среды, заготовки и инструмента, °C	20							
	Направление обжима	Двухсторонний со стороны кромок	Глубина проушины, мм	5; 8; 11	Глубина деформированной зоны h_3	15	1	1	15
	Усилие обжима, кН	1							
	Скорость прессования, мм/мин	50							

Таблица 4.3 – Методическая сетка проведения эксперимента типа ПФЭ 2³ по определению зависимостей выходных параметров процесса прессования от режимных факторов для заготовок из древесины березы

Исследуемый процесс	Постоянные факторы		Переменные факторы		Выходной параметр	Количество опытов	Количество повторений опытов	Количество наблюдений в опыте	Общее количество наблюдений
	наименование, единицы измерения	значение	наименование, единицы измерения	значение					
Прессование одинарных проушин	Порода древесины	береза	Влажность, %	8; 13; 18	Усилие прессования F_e	8+4	1	1	12
	Наклон волокон, %	≤ 10							
	Ориентация пласти	тангенциальная							
	Размеры заготовки ($S \times B_3 \times L$), мм	25×40×60	Ширина проушины, мм	4; 12; 20	Увеличение твердости дна проушин HRL	8+4	1	3	36
	Температура среды, заготовки и инструмента, °С	20							
	Направление обжима	Двухсторонний со стороны кромок	Глубина проушины, мм	5; 8; 11	Глубина деформированной зоны h_3	8+4	1	1	12
	Усилие обжима, кН	1,2							
	Скорость прессования, мм/мин	50							

Таблица 4.4 – Методическая сетка проведения эксперимента типа ПФЭ 2³ по определению зависимостей выходных параметров процесса прессования от режимных факторов для заготовок из древесины дуба

Исследуемый процесс	Постоянные факторы		Переменные факторы		Выходной параметр	Количество опытов	Количество повторений опытов	Количество наблюдений в опыте	Общее количество наблюдений
	наименование, единицы измерения	значение	наименование, единицы измерения	значение					
Прессование одинарных проушин	Порода древесины	дуб	Влажность, %	8; 13; 18	Усилие прессования F_e	15	1	1	15
	Наклон волокон	≤ 10							
	Ориентация пласти	тангенциальная							
	Размеры заготовки ($S \times B_3 \times L$), мм	25×40×60	Ширина проушины, мм	4; 12; 20	Увеличение твердости дна проушин HRL	15	1	3	45
	Температура среды, заготовки и инструмента, °С	20							
	Направление обжима	Двухсторонний со стороны кромок	Глубина проушины, мм	5; 8; 11	Глубина деформированной зоны h_3	15	1	1	15
	Усилие обжима, кН	1,2							
	Скорость прессования, мм/мин	50							

4.1.2 Статистическая обработка результатов экспериментальных исследований по определению усилия прессования

Результаты экспериментов по определению усилия прессования, реализованных по матрицам (таблицы 3.5, 3.6), приведены в таблице 4.5. Выходной параметр обозначен как y_1 .

Таблица 4.5 – Результаты реализации экспериментов по оценке усилия прессования

Номер опыта	Сосна		Береза		Дуб	
	тип плана	y_1 , Н	тип плана	y_1 , Н	тип плана	y_1 , Н
1	НПВП 3^{3-1}	12356,32	ПФЭ 2^3	34323,10	ПФЭ 2^3	36284,47
2		10787,26		31184,99		47071,68
3		17848,01		29419,80		33930,84
4		19024,80		31871,45		46091,02
5		13533,11		9610,47		8825,94
6		19122,87		6080,09		10395,00
7		4903,30		8433,68		8629,81
8		30204,33		8238,54		5727,05
9		5099,43	-	-	-	
10		13925,37	-	-	-	
11		25006,83	-	-	-	
12		5883,96	-	-	-	
13		22555,18	-	-	-	
14		5197,50	-	-	-	
15		13533,11	-	-	-	

Статистическая обработка экспериментальных данных проведена по методике, описанной в пп. 3.5.2.2 – 3.5.2.3. Проведена оценка воспроизводимости экспериментов по результатам опытов в центре плана. Для древесины сосны опыты в центре плана поставлены по опытам номер 5, 10 и 15 из мат-

рицы в таблице 3.6, для древесины березы и дуба – по матрице, приведенной в таблице 3.7. Среднее арифметическое значение параметра оптимизации \bar{y} в центре плана вычислено по формулам (3.26) и (3.44), дисперсии воспроизводимости s_y^2 – по формулам (3.10) и (3.42). Полученные значения параметров $y_{0u}(y_u)$ и s_y^2 приведены в таблице 4.6.

Таблица 4.6 – Значения откликов в центре плана и дисперсий воспроизводимости

Порода	Номер опыта	$y_{0u}(y_u)$	s_y^2
Сосна	5	13533,11	51289,30
	10	13925,37	
	15	13533,11	
Береза	9	20495,79	220386,91
	10	20888,06	
	11	20201,60	
	12	21280,32	
Дуб	9	24614,57	33435,30
	10	24320,37	
	11	24536,11	
	12	24222,30	

Определены значения коэффициентов: для регрессий вида (3.16) по формулам (3.28) – (3.30), для регрессии вида (3.33) по формулам (3.34) – (3.37). Коэффициенты приведены в таблице 4.7.

Для проверки значимости коэффициентов уравнения регрессии вычислены дисперсии и доверительные интервалы по выражениям (3.31), (3.22), (3.38) – (3.44). Использовались табличные значения критерия t_T , определенные по [242] для принятого уровня значимости (5 %) и числа степеней свободы: для сосны $f = n_0 - 1 = 2$: $t_T = 4,3$; для березы и дуба $f = n_0 - 1 = 3$: $t_T = 3,18$.

Доверительные интервалы приведены в таблице 4.8. Значимость коэффициентов отмечена в таблице 4.7 полужирным шрифтом.

Таблица 4.7 – Значения коэффициентов уравнения регрессии

Коэффициент	Сосна	Береза	Дуб
b_0	14768,99	19895,27	24619,48
b_1	-3125,85	-551,50	2701,71
b_2	441,30	-404,40	-1024,80
b_3	9475,63	11804,57	16225,03
b_{12}	686,46	1115,63	-387,36
b_{13}	-2721,33	379,88	3035,14
b_{23}	441,30	-649,81	191,22
b_{11}	-362,09	-	-
b_{22}	-276,28	-	-
b_{33}	-206,35	-	-
b_{123}	-	281,82	730,60

Примечание – Полужирным шрифтом выделены значимые коэффициенты

Таблица 4.8 – Значения доверительных интервалов коэффициентов регрессий

Порода	Δb_0	Δb_i	Δb_{ii}	Δb_{ii}
Сосна	562,24	344,30	486,91	253,40
Береза	-	542,81	-	-
Дуб	-	205,58	-	-

Уравнения регрессии приняли следующий вид:

- для образцов из древесины сосны (коэффициент детерминации $R_I^2 = 0,9950$):

$$y_i = 14768,99 - 3125,85x_1 + 441,30x_2 + 9475,63x_3 - 362,09x_1^2 - 276,28x_2^2 + 686,46x_1x_2 - 2721,33x_1x_3, \quad (4.1)$$

- из древесины березы ($R_I^2 = 0,9919$):

$$y_i = 19895,26 - 551,50x_1 + 11804,57x_3 + 1115,63x_1x_2 - 649,81x_2x_3, \quad (4.2)$$

- из древесины дуба ($R_I^2 = 0,9998$):

$$y_{1H} = 24619,48 + 2701,71x_1 - 1024,80x_2 + 16225,03x_3 - 387,36x_1x_2 + 3035,14x_1x_3 + 730,60x_1x_2x_3 \quad (4.3)$$

Точность проведенных вручную расчетов подтверждена проверкой в программном пакете Statistica. На рисунке 4.2 приведен пример оценки эффектов для отклика y_1 для образцов из древесины сосны. Красным шрифтом отмечены значимые эффекты.

Оценки эффектов; R-кв. = ,99496; Скор. ,98992 (Факторный эксперимент СОСНА) 3 3-х уровневые ф., 1 Блоки, SS чист.ошиб. = ЗП Усилие в Н										
Фактор	Эффект	Ст.Ош. Чис. Ош.	t(2)	p	-95,%		Коэф.	Ст.Ош. Коэф.	+95,%	
					Дов.Пред	Дов.Пред			Дов.Пред	Дов.Пред
Сред/Св.член	14768,99	62,8125	235,1282	0,000018	14498,73	15039,25	14768,99	62,8125	14498,73	15039,25
(1)Влажность W, %(L)	-6251,71	160,1411	-39,0387	0,000656	-6940,74	-5562,68	-3125,85	80,0706	-3470,37	-2781,34
Влажность W, %(K)	-724,18	117,5114	-6,1626	0,025335	-1229,79	-218,57	-362,09	58,7557	-614,90	-109,28
(2)Глубина проушины Н, мм(L)	882,59	160,1411	5,5114	0,031380	193,56	1571,63	441,30	80,0706	96,78	785,81
Глубина проушины Н, мм(K)	-552,56	117,5114	-4,7022	0,042373	-1058,18	-46,95	-276,28	58,7557	-529,09	-23,48
(3)Ширина проушины В, мм(L)	18951,25	160,1411	118,3410	0,000071	18262,22	19640,29	9475,63	80,0706	9131,11	9820,14
1L на 2L	1372,92	226,4737	6,0622	0,026148	398,49	2347,36	686,46	113,2369	199,24	1173,68
1L на 3L	-5442,66	226,4737	-24,0322	0,001727	-6417,10	-4468,23	-2721,33	113,2369	-3208,55	-2234,11

Рисунок 4.2 – Оценки эффектов для отклика y_1 для образцов из древесины сосны

Качество полученных моделей оценено на основе проверки нормальности распределения остатков с помощью гистограмм, нормально-вероятностных графиков, диаграмм рассеяния, построенных в программном пакете Statistica. Их анализ показал, что гипотеза о нормальности распределения может не отклоняться. Например, на нормально-вероятностном графике (рисунок 4.3) практически не наблюдается серьезных систематических отклонений фактических данных от теоретической нормальной прямой. Остатки хорошо укладываются на нормальную прямую, следовательно, распределение близко к нормальному. В целом, по результатам анализа остатков, полиномиальная форма зависимости выбрана обоснованно и полученная регрессионная модель должна работать достаточно качественно.

Проверка адекватности моделей проведена по F -критерию Фишера с использованием формул (3.32), (3.45) – (3.47). Для образцов из древесины сосны расчетное значение критерия составило $F_p = 18,90$ при $F_T = 19,3$; из древесины березы – $F_p = 3,51$, из древесины дуба – $F_p = 2,19$ при $F_T = 9,1$.

Условие $F_{p_1} < F_T$ выполнено, следовательно, полученные модели отклика адекватны.

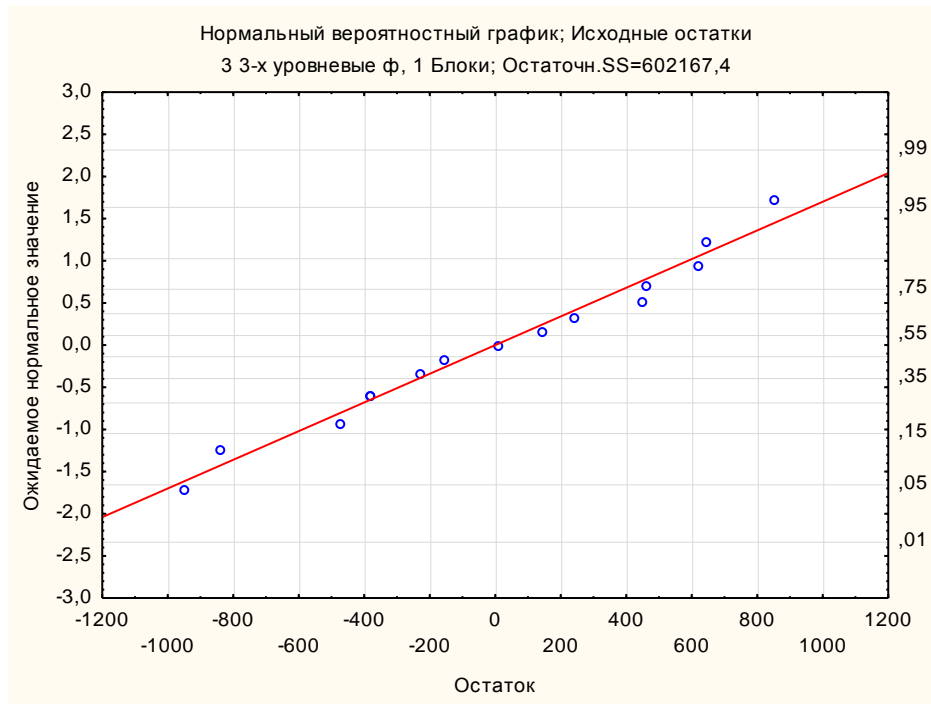


Рисунок 4.3 – Графическое представление нормальности распределения остатков модели для отклика y_1 для образцов из древесины сосны на нормально-вероятностном графике

Качество моделей подтверждается также высокими значениями коэффициентов детерминации R^2 , определенными посредством программного пакета Statistica. (Коэффициент детерминации R^2 показывает долю изменчивости отклика, происходящую под одновременным воздействием всех включенных в модель факторов).

Переход от кодированных значений (x_1, x_2, x_3) к натуральным (W, h_n, B) осуществлен по формулам (4.4) – (4.6):

$$x_1 = \frac{W - W_0}{\Delta W}, \quad (4.4)$$

$$x_2 = \frac{h_n - h_{n0}}{\Delta h_n}, \quad (4.5)$$

$$x_3 = \frac{B - B_0}{\Delta B}, \quad (4.6)$$

где $\Delta W, \Delta h, \Delta B$ – интервалы варьирования факторов;

W_0, h_{n0}, B_0 – основные уровни факторов в натуральных выражениях.

Уравнения регрессии (4.1) – (4.3) преобразованы в уравнения зависимости усилия прессования от влажности, глубины и ширины проушины:

- для образцов из древесины сосны:

$$F_{es} = 9625,88 - 928,03W - 1430,17h_n + 2068,89B + 28,97W^2 + 61,40h^2 + 45,76Wh_n - 68,03WB, \quad (4.7)$$

- из древесины березы

$$F_{eb} = 5129,73 - 788,40W + 1814,73B + 70,12Wh_n - 56,53h_nB, \quad (4.8)$$

- из древесины дуба

$$F_{ed} = 4716,61 + 346,60W + 1382,70h_n - 1007,01B - 239,01Wh_n + 357,66WB + 2,90Wh_nB. \quad (4.9)$$

Полученные эмпирические модели (4.7) – (4.9) использованы далее в п. 4.2 для определения корректирующих коэффициентов влияния породы и влажности для уточнения аналитической математической модели (2.25), описывающей взаимосвязь усилия прессования с параметрами технологического режима и справочными характеристиками древесины. Модели применены также в п. 4.5 для решения задачи оптимизации по определению рациональных значений параметров технологических режимов процесса торцового прессования элементов шиповых соединений.

4.1.3 Анализ результатов экспериментальных исследований усилия прессования

В процессе анализа результатов экспериментальных исследований изучены полученные эмпирические модели (4.4) – (4.9) зависимости усилия прессования от влажности, глубины и ширины проушины, получены графические интерпретации моделей в виде трех- и двумерных графиков средствами визуализации программных пакетов Statistica и Microsoft Excel, изучены карты Парето для эффектов (факторов), построенные в Statistica.

4.1.3.1 Анализ эмпирической модели для расчета усилия прессования прямоугольной проушины в древесине сосны.

На рисунке 4.4 приведена карта Парето для факторов модели (4.1). На рисунке 4.5 приведены примеры графической интерпретации модели (4.7) в виде графиков зависимости усилия прессования F_{es} от влажности древесины W , ширины B и глубины h_n проушины.

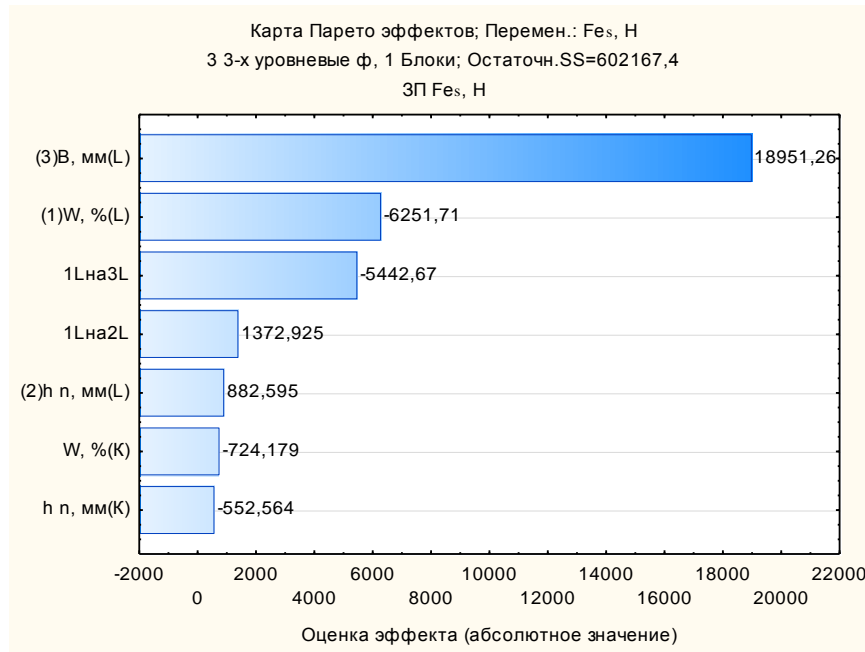
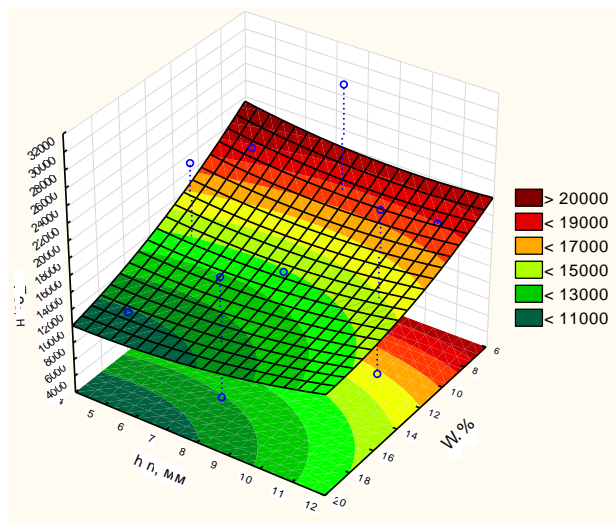


Рисунок 4.4 – Карта Парето для факторов модели отклика u_1 для образцов из древесины сосны

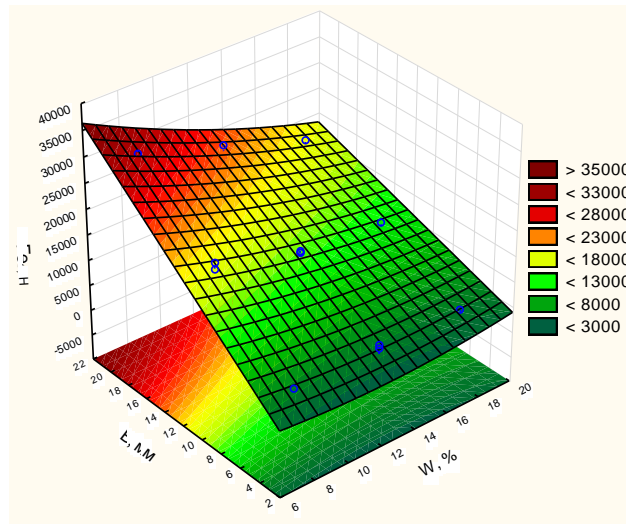
В результате анализа уравнения (4.7) и построенных графиков отмечено следующее:

- в исследованном диапазоне наибольшее влияние на усилие прессования F_{es} оказывает изменение ширины проушины B , на втором месте по степени влияния находится влажность древесины W , глубина формируемой проушины h_n оказывает наименьшее влияние;

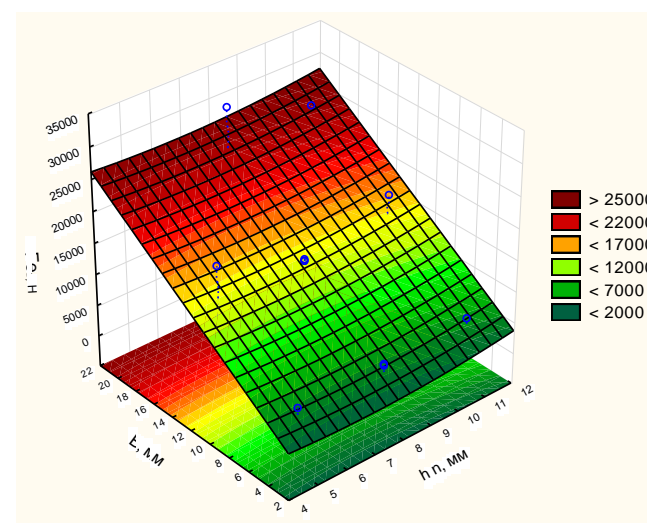
- при увеличении ширины проушины на 1 мм усилие прессования увеличится примерно на 2069 Н, что составит приблизительно 36,2 % от маргинального среднего значения усилия (вычисленного в программном пакете Statistica) при ширине проушины 4 мм;



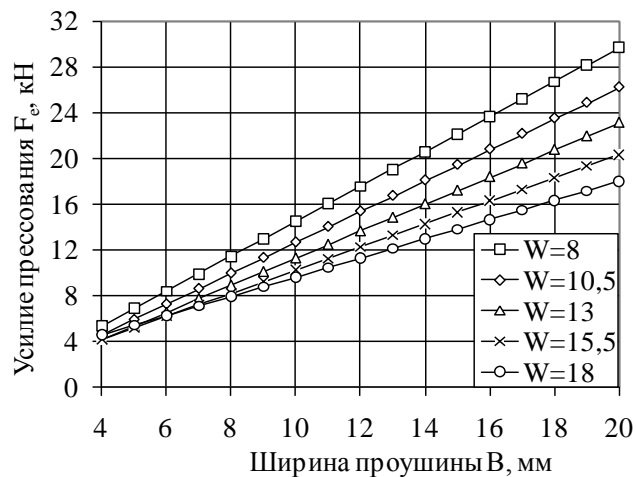
а



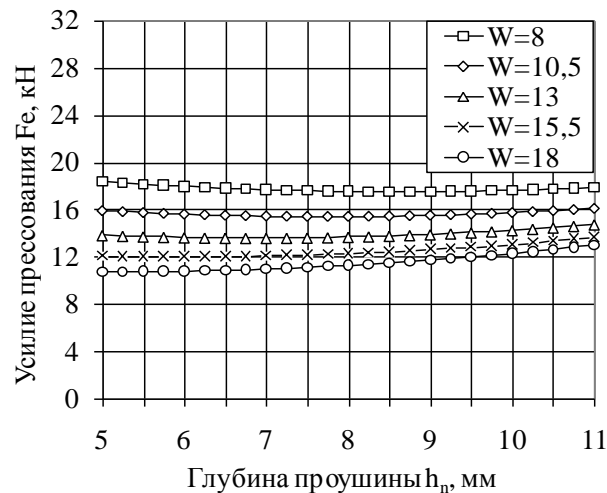
б



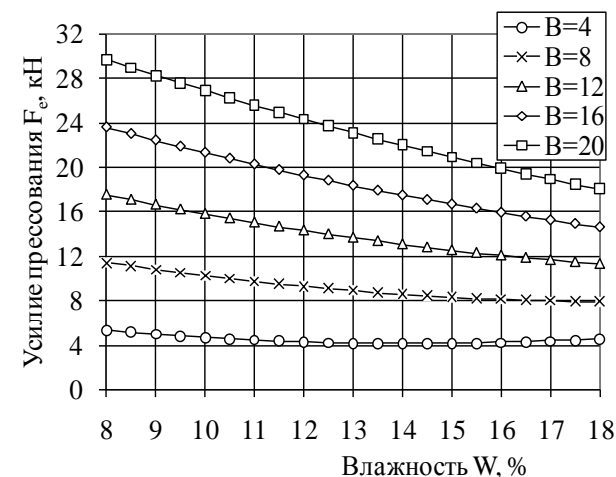
в



з



д



е

Рисунок 4.5 – Зависимость усилия прессования F_{es} прямоугольной проушины в древесине сосны:
 а – от глубины проушины h_n и влажности W при ширине проушины $B = 12$ мм; б – от B и W при $h_n = 8$ мм;
 в – от B и h_n при $W = 13$ %; з – от B при $h_n = 8$ мм; д – от h_n при $B = 12$ мм; е – от W при $h_n = 8$ мм

- при увеличении влажности на 1 % усилие прессования уменьшится приблизительно на 928 Н, что составит примерно 5,2 % от маргинального среднего значения усилия при влажности 8 %;

- минимальные значения усилия наблюдаются при различных сочетаниях факторов; для поиска минимальных значений необходимо использование методов оптимизации.

4.1.3.2 Анализ эмпирической модели для расчета усилия прессования прямоугольной проушины в древесине березы.

На рисунке 4.6 приведена карта Парето для факторов модели (4.2). На рисунке 4.7 приведены примеры графической интерпретации модели (4.8) в виде графиков зависимости усилия прессования F_{eb} от влажности древесины W , ширины B и глубины h_n проушины.

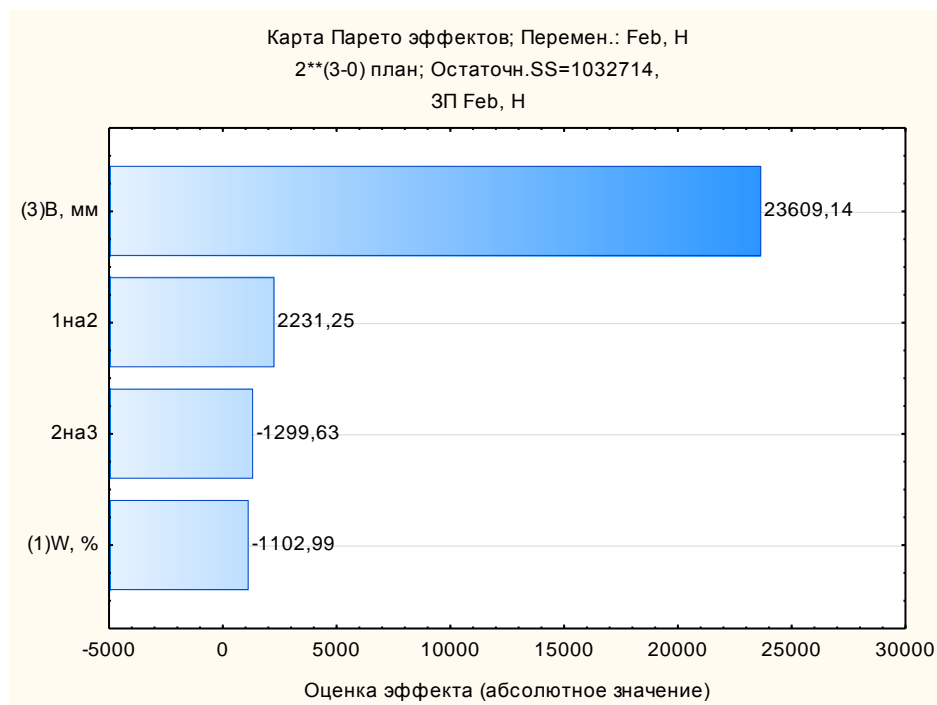
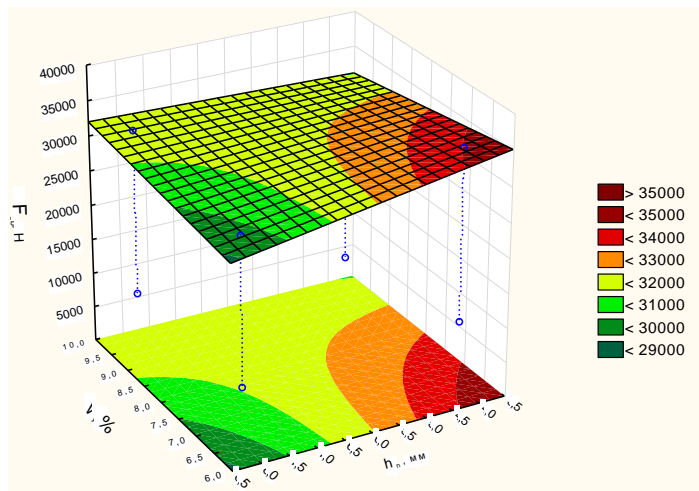
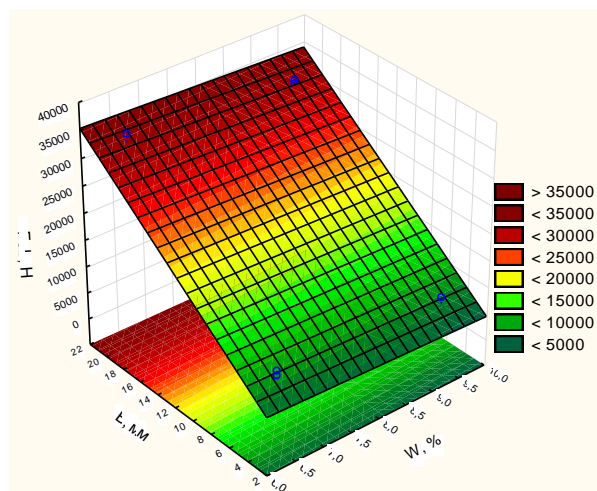


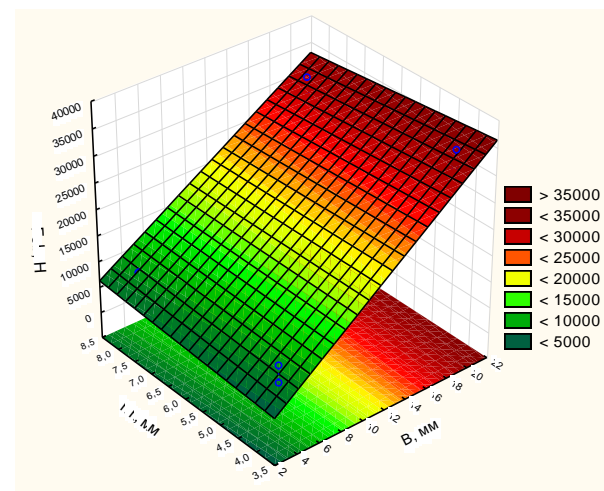
Рисунок 4.6 – Карта Парето для факторов модели отклика u_1 для образцов из древесины березы



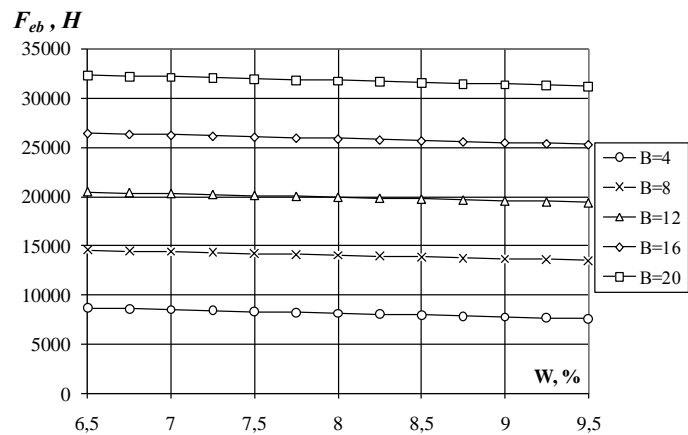
a



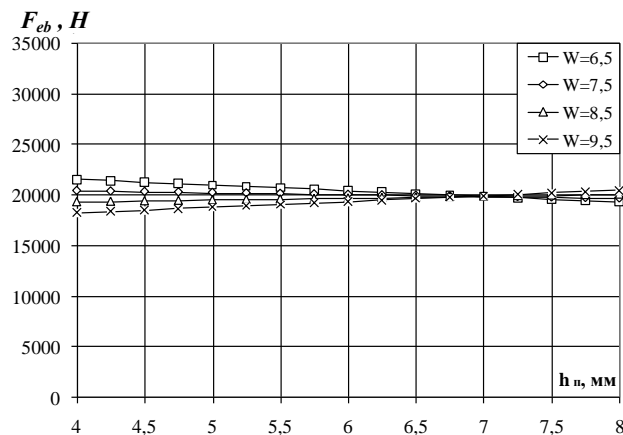
б



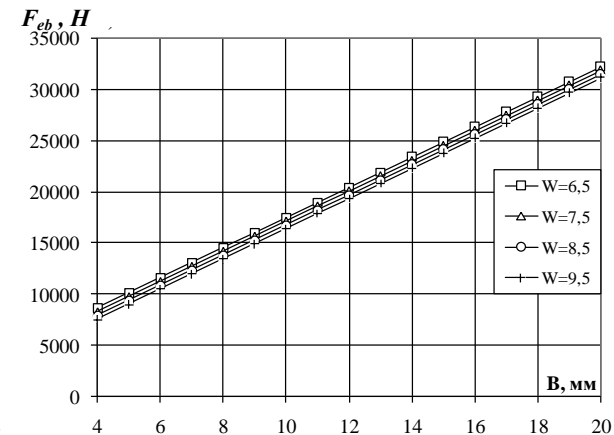
в



г



д



е

Рисунок 4.7 – Зависимость усилия прессования F_{eb} прямоугольной проушины в древесине березы:
a – от глубины проушины h_n и влажности W при ширине проушины $B = 12$ мм; *б* – от B и W при $h_n = 6$ мм;
в – от B и h_n при $W = 8$ %; *г* – от W при $h_n = 6$ мм; *д* – от h_n при $B = 12$ мм; *е* – от W при $h_n = 6$ мм

В результате анализа уравнения (4.8) и построенных графиков отмечено следующее:

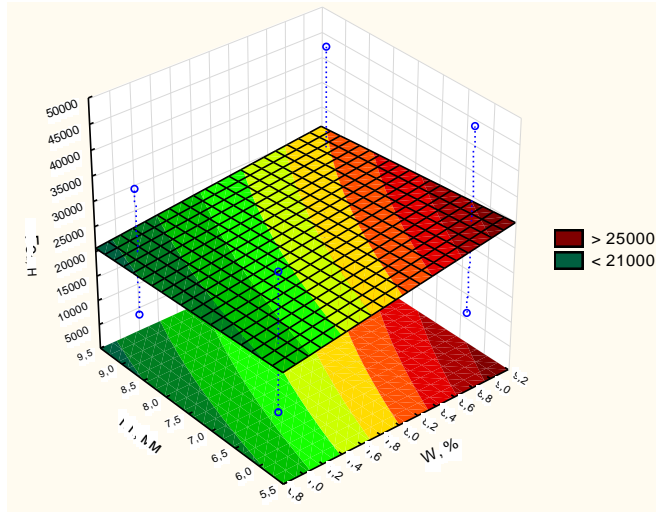
- в исследованном диапазоне наибольшее влияние на усилие прессования F_{es} оказывает изменение ширины проушины B , на втором месте по степени влияния находится влажность древесины W , глубина формируемой проушины h_n оказывает наименьшее влияние;
- при увеличении ширины проушины на 1 мм усилие прессования увеличится примерно на 1815 Н;
- при увеличении влажности на 1 % усилие прессования уменьшится приблизительно на 788 Н;
- минимальные значения усилия наблюдаются при различных сочетаниях факторов; для поиска минимальных значений необходимо использование методов оптимизации.

4.1.3.3 Анализ эмпирической модели для расчета усилия прессования прямоугольной проушины в древесине дуба.

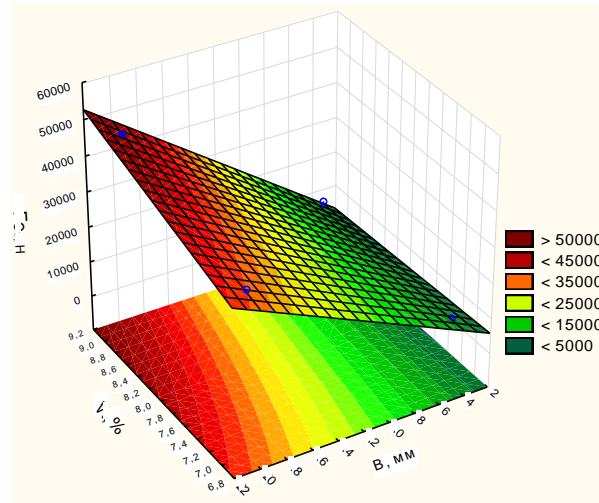
На рисунке 4.8 приведены примеры графической интерпретации модели (4.9) в виде графиков зависимости усилия прессования F_{ed} от влажности древесины W , ширины B и глубины h_n проушины. На рисунке 4.9 приведена карта Парето для факторов модели (4.3).

В результате анализа уравнения (4.9) и построенных графиков отмечено следующее:

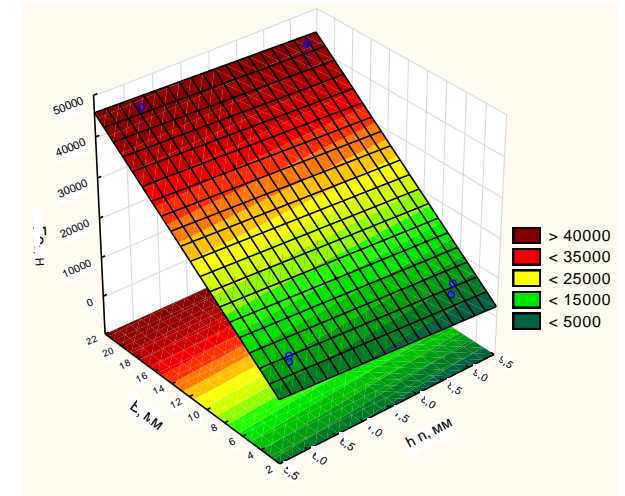
- в исследованном диапазоне наибольшее влияние на усилие прессования F_{es} оказывает изменение ширины проушины B , на втором месте по степени влияния находится влажность древесины W , глубина формируемой проушины h_n оказывает наименьшее влияние;
- при увеличении ширины проушины на 1 мм усилие прессования увеличится примерно на 1383 Н;
- при увеличении влажности на 1 % усилие прессования уменьшится приблизительно на 347 Н;



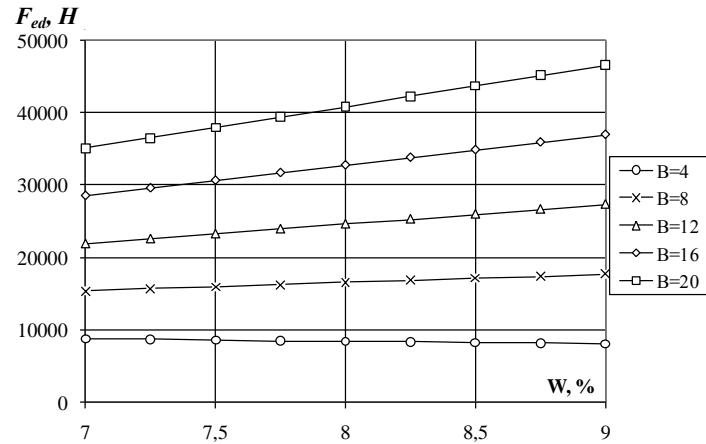
a



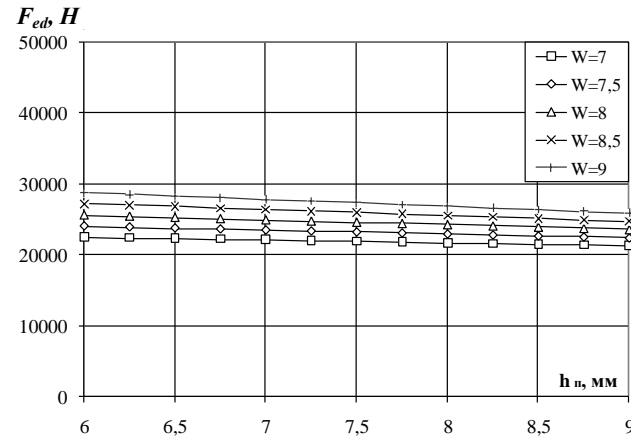
б



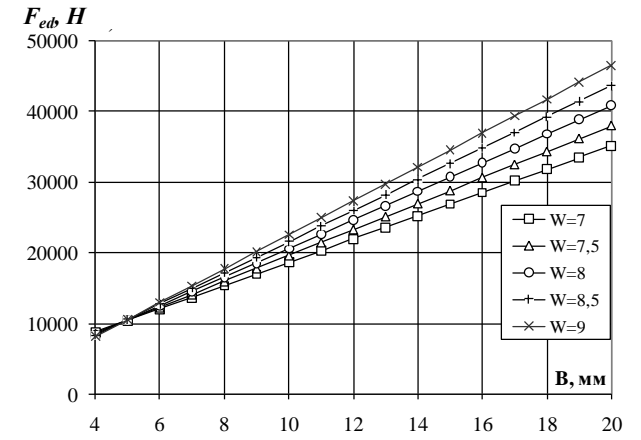
в



г



д



е

Рисунок 4.8 – Зависимость усилия прессования F_{eb} прямоугольной проушины в древесине дуба:
a – от глубины проушины h_n и влажности W при ширине проушины $B = 12$ мм; *б* – от B и W при $h_n = 7,5$ мм;
в – от B и h_n при $W = 8$ %; *г* – от W при $h_n = 7,5$ мм; *д* – от h_n при $B = 12$ мм; *е* – от W при $h_n = 7,5$ мм

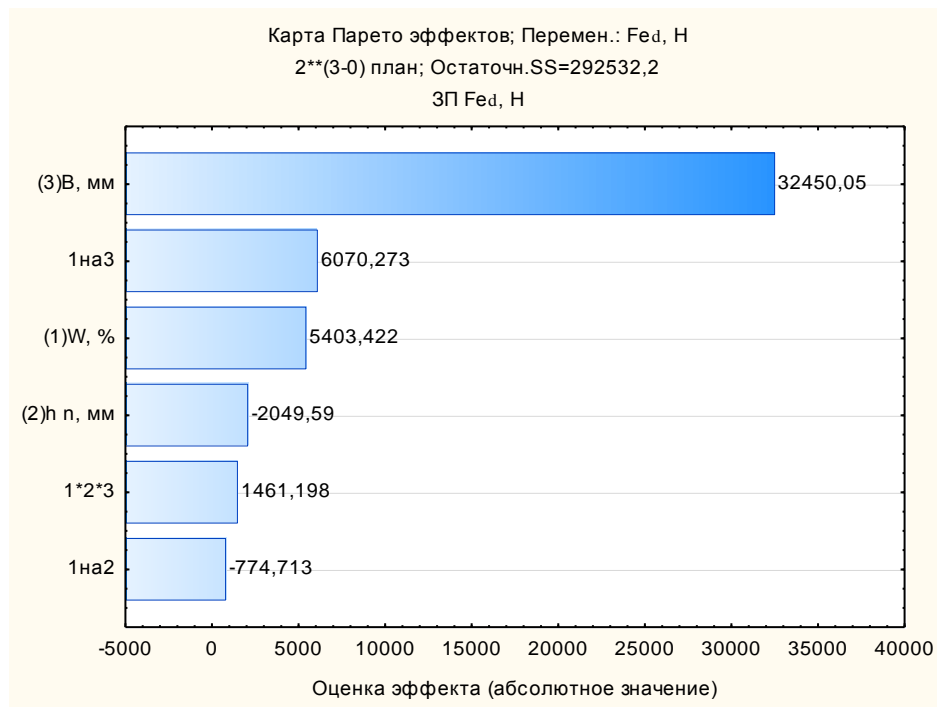


Рисунок 4.9 – Карта Парето для факторов модели отклика u_1 для образцов из древесины дуба

- минимальные значения усилия наблюдаются при различных сочетаниях факторов; для поиска сочетаний факторов, обеспечивающих минимальные значения усилия, необходимо использование методов оптимизации.

Полученные результаты позволили сделать следующие *выводы*:

- для рассматриваемых пород наиболее значимыми факторами по степени влияния на усилия прессования являются ширина проушины и влажность древесины. Меньшее влияние оказывает глубина формируемой проушины;
- для поиска сочетаний факторов, обеспечивающих минимальные значения усилия прессования, необходимо использование методов оптимизации;
- уменьшение ширины формируемой проушины является способом снижения энергосиловых затрат на реализацию процесса прессования.

4.1.4 Уточнение аналитической модели для расчета усилия прессования

Для проверки сходимости разработанной аналитической модели (2.25) с эмпирическими зависимостями (4.7) – (4.9) проведены расчеты со следующими исходными данными:

- коэффициенты трения $f_m = 0,45$, $f_{dr} = 0,2$;

- характеристики древесины сосны: $\sigma = 46$ МПа, $\mu_{ta} = 0,41$, $\mu_{ra} = 0,49$, $\tau_{ck} = 7,4$ МПа;

- характеристики древесины березы: $\sigma = 54$ МПа, $\mu_{ta} = 0,45$, $\mu_{ra} = 0,58$, $\tau_{ck} = 9$ МПа;

- характеристики древесины дуба: $\sigma = 57$ МПа, $\mu_{ta} = 0,41$, $\mu_{ra} = 0,43$, $\tau_{ck} = 9,9$ МПа.

Характеристики процесса прессования, размеры заготовки, размеры получаемой проушины и интервалы варьирования факторов W , h_n , B приведены в п. 3.2, п. 3.4.1.

Характеристики древесины σ , μ_{ra} , μ_{ta} , f_{dr} , f_m , τ_{ck} зависят от влажности [273]. При изменении влажности коэффициенты μ_{ra} , μ_{ta} и напряжения σ , τ_{ck} пересчитываются соответственно по формулам (4.10) и (4.11):

$$C_w = C_{12}(1 - 0,2(W - 12)), \quad (4.10)$$

$$B_w = \frac{B_{12}}{1 + \alpha(W - 12)}, \quad (4.11)$$

где C_{12} , B_{12} – показатель свойства при влажности 12 %;

C_w – показатель свойства при влажности W ;

W – влажность древесины в момент испытаний;

α – поправочный коэффициент, $\alpha = 0,03$ для расчета τ_{ck} , $\alpha = 0,04$ для расчета σ .

Сравнительный анализ теоретической зависимости (2.25) с эмпирическими моделями (4.7) – (4.9) провели по следующей схеме:

1) сравнили результаты расчетов по аналитической и эмпирическим моделям;

2) определили факторы, оказывающие наибольшее влияние на расхождение сравниваемых зависимостей;

3) нашли корректирующие коэффициенты k_i для всего диапазона варьирования наиболее значимого фактора;

4) определили среднее значение корректирующего коэффициента k .

В качестве примера приведена последовательность определения корректирующего коэффициента k для древесины сосны.

Графики на рисунке 4.10 иллюстрируют аналитическую модель и эмпирическую зависимость усилия прессования F (F_{es}) от переменных факторов – влажности W , глубины h_n и ширины B проушины.

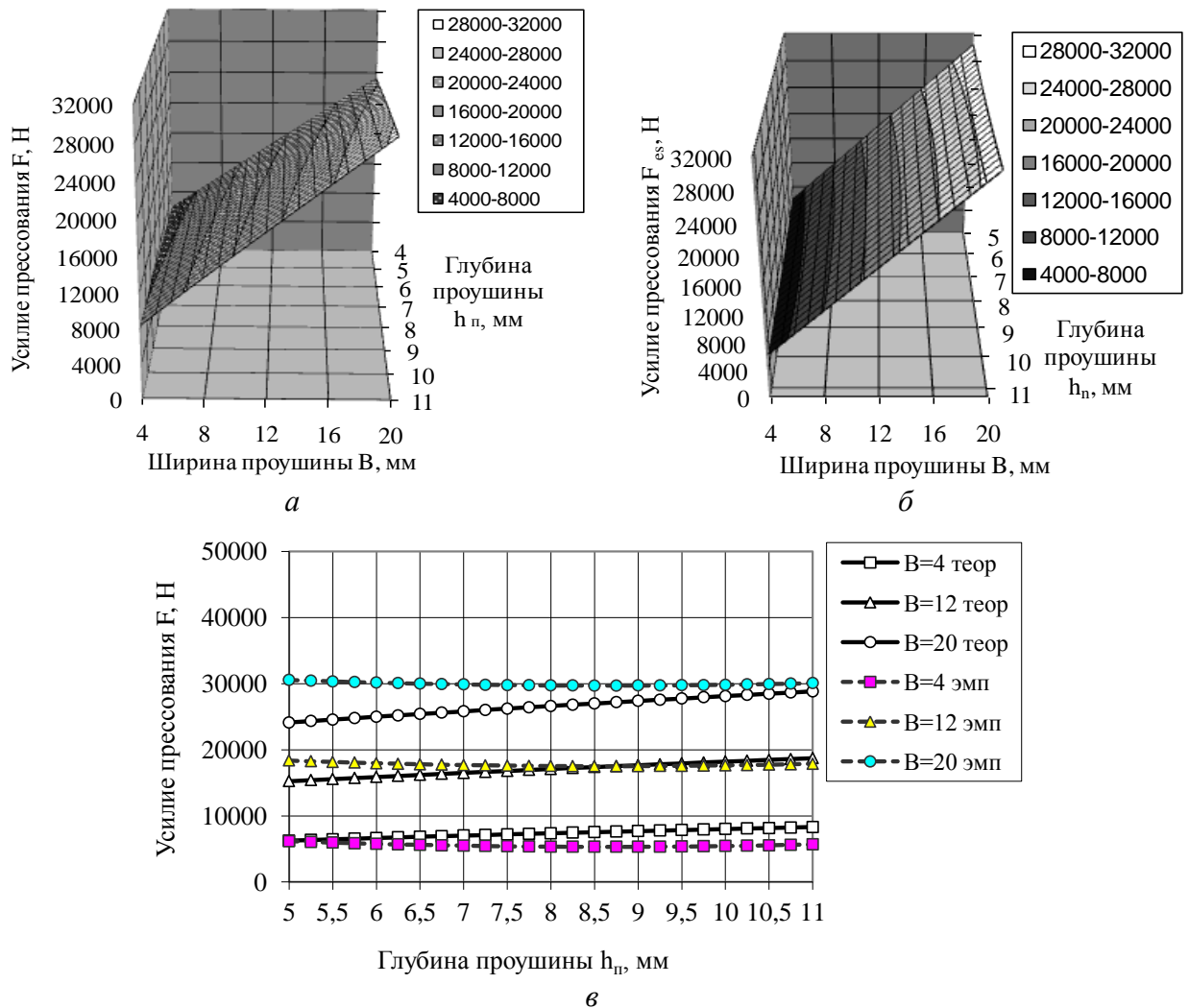


Рисунок 4.10 – Графики зависимостей F от h_n и B для древесины сосны при $W=8\%$: a – теоретический; $б$ – эмпирический; $в$ – теоретические и эмпирические графики

В таблице 4.9 приведены результаты сравнения значений усилия пресования прямоугольной проушины в древесине сосны, рассчитанных по теоретической (2.25) и эмпирической (4.7) моделям.

Таблица 4.9 – Расхождение расчетов по аналитической и эмпирической моделям, %

Влажность	Параметры проушины					
	B=4		B=12		B=20	
	$h_n=5$	$h_n=11$	$h_n=5$	$h_n=11$	$h_n=5$	$h_n=11$
W=8	-7,59	25,33	-29,43	-5,43	-35,23	-15,08
W=13	38,60	44,00	21,20	29,65	16,65	25,05
W=18	52,23	43,18	48,43	47,55	47,37	48,46

В результате сравнения полученных расчетных данных было установлено, что наибольшее влияние на расхождение результатов расчетов оказывает изменение влажности W . Для уточнения аналитической модели приняли решение использовать корректирующие коэффициенты k , учитывающие влияние влажности:

$$F_k = k \cdot F. \quad (4.12)$$

Корректирующий коэффициент k_w определяли в следующей последовательности:

1) нашли значение соотношения $k_{hbw} = F/F_e$, изменяя значение h_n в заданном интервале варьирования ($h_n = 4 \div 11$ мм с шагом 0,25 мм), задаваясь значениями B на нижнем, основном и верхнем уровнях (4 мм, 12 мм, 20 мм) при минимальном значении влажности (нижний уровень $W = 8\%$);

2) определили значение соотношения $k_{hbw} = F/F_e$ при $W = 10 \div 18\%$ с шагом 2 %;

3) для каждого уровня влажности нашли значение $k_{bwi} = F/F_e$ как среднее арифметическое на диапазоне варьирования фактора h_n (таблица 4.10, рисунок 4.11);

4) определили значения коэффициентов k_{wi} как средних арифметических на диапазоне варьирования фактора W ;

5) определили значение корректирующего коэффициента k как среднего арифметического значений k_w .

Таблица 4.10 – Корректирующие коэффициенты для расчета усилия прессования в древесине сосны

Влажность $W, \%$	k_{bwi}			k_{wi}	k
	$B = 4$	$B = 12$	$B = 20$		
8	0,81	1,13	1,16	1,03	1,12
10	0,68	0,96	1,00	0,88	
12	0,60	0,83	0,87	0,77	
14	0,57	0,74	0,77	0,69	
16	0,60	0,65	0,69	0,65	
18	0,68	0,60	0,63	0,64	

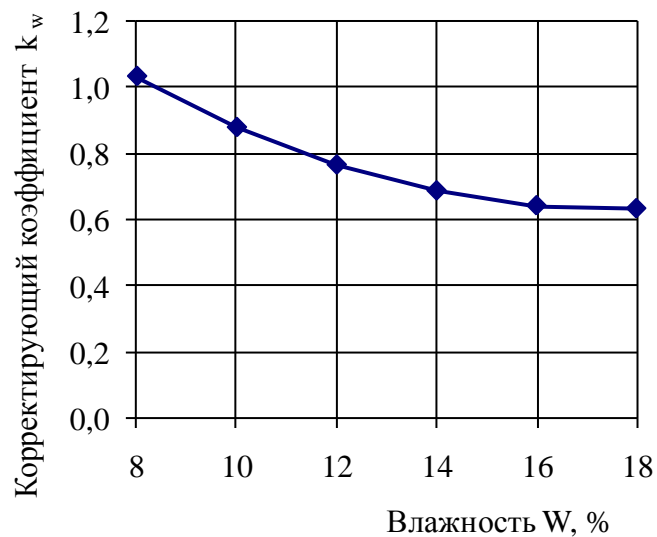


Рисунок 4.11 – Зависимость корректирующего коэффициента k_w от влажности для древесины сосны

В результате определено значение корректирующего коэффициента для сосны: $k = 1,1219$.

Усилие прессования проушины может быть определено по зависимости:

$$F_k = k \cdot F = k \cdot n \left(\sigma_{BS} \left(2 - e^{-2 \left(f_{m\mu_{ra}} \frac{1}{S} + f_{dr\mu_{ra}} \frac{1}{B} \right) h_n} \right) + 2\tau_{ck} S h_n \right), \quad (4.13)$$

где k – корректирующий коэффициент, для сосны $k = 1,12$;

F – усилие прессования, рассчитываемое по теоретической зависимости (2.25).

Отклонения уточненной модели (4.11) от эмпирических данных на исследованном диапазоне не превышают 7 %. На рисунке 4.12 для сравнения приведены графики зависимости усилия прессования в древесине сосны от ширины проушины для аналитической модели (2.25), эмпирической модели (4.7) и уточненной модели (4.11).

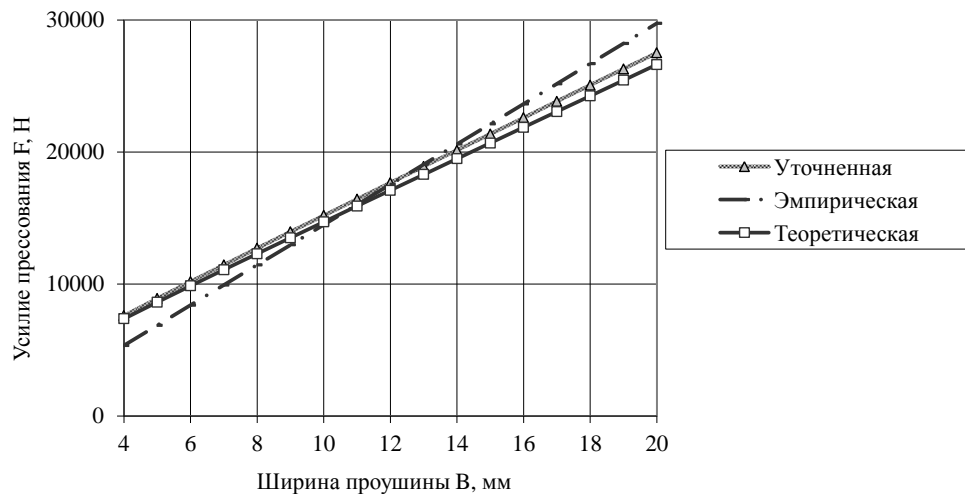


Рисунок 4.12 – Сравнение графиков теоретической, эмпирической и уточненной моделей зависимости F от B при $W = 18\%$ и $h_n = 8$ мм (сосна)

По аналогичной методике рассчитаны корректирующие коэффициенты для березы $k = 1,1029$ и дуба $k = 1,4227$. Сравнение графиков уточненных моделей с эмпирическими зависимостями приведено на рисунке 4.13. Отмечена хорошая сходимость данных моделей в исследованном диапазоне: отклонения уточненных моделей от эмпирических не превышают 7 %.

Уточненная модель для расчета усилия торцового прессования прямоугольной проушины в заготовках из древесины сосны, березы и дуба пред-

ставлена в виде схемы на рисунке 4.14. Данная модель может быть использована для прогнозирования с достаточной степенью точности величины усилия прессования в исследованном диапазоне параметров технологического режима.

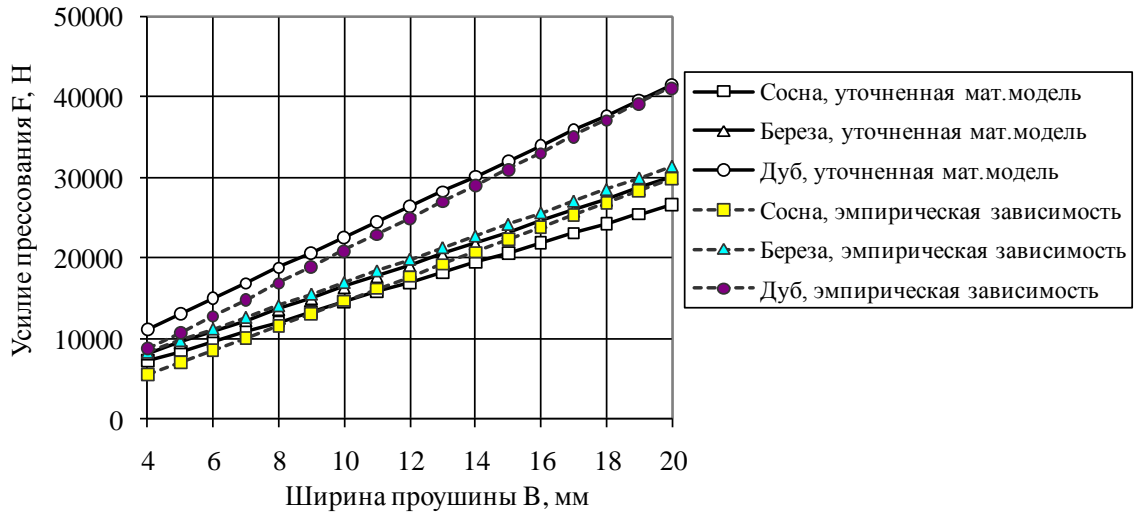


Рисунок 4.13 – Графики уточненных моделей и эмпирических зависимостей F от B , при $W = 8 \%$ и $h_n = 7 \text{ мм}$

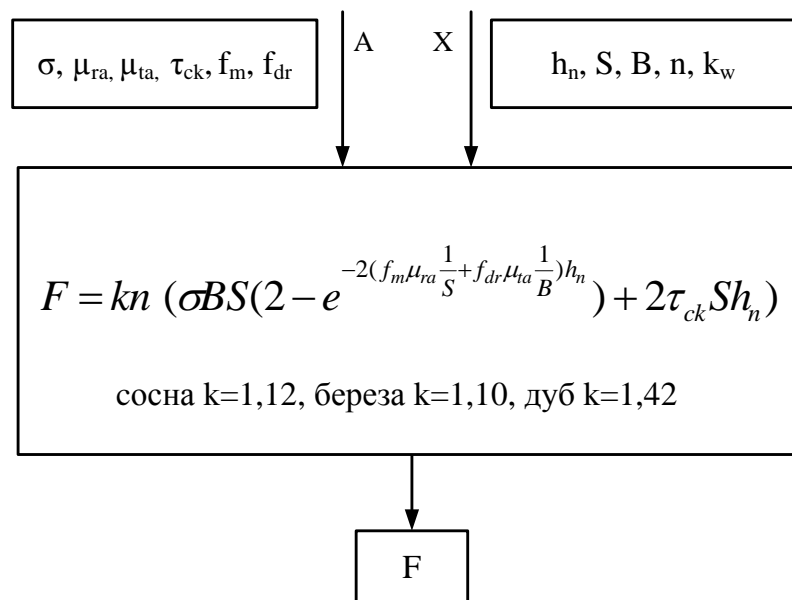


Рисунок 4.14 – Уточненная математическая модель для расчета усилия прессования прямоугольной проушины в заготовках из древесины сосны, березы, дуба

Факторы σ , f_m , f_{dr} , μ_{ra} , μ_{ta} , τ_{ck} принимаются как условно постоянные (постоянно их базовое значение для данной породы древесины, при влажности 12 %). При изменении влажности параметры σ , μ_{ra} , μ_{ta} , τ_{ck} необходимо пересчитать по формулам (4.10) и (4.11). Факторы h_n , S , B , n , k являются переменными, зависят от количества и параметров проушин, породы и состояния древесины, формы и материала пуансона.

4.2 Исследование влияния параметров режима прессования на показатели глубины деформированной зоны и твердости дна проушины

Планирование экспериментов описано в п. 4.1.1, уровни и интервалы варьирования факторов приведены в таблице 4.1, методические сетки проведения экспериментов – в таблицах 4.2 – 4.4.

4.2.1 Результаты экспериментальных исследований по определению глубины деформированной зоны и твердости дна проушины

Результаты экспериментов по определению глубины деформированной зоны и твердости дна проушины, реализованных по матрицам (таблицы 3.5, 3.6), приведены в таблице 4.11. Выходные параметры обозначены как y_2 и y_3 соответственно.

Для получения откликов y_2 для h_3 и y_3 для HRL (HRM) проведена математическая обработка экспериментальных данных по методике, изложенной в пп. 3.5.2.1 – 3.5.2.3, по формулам (3.9) – (3.47). Проведенные расчеты подтвердили гипотезы об отсутствии грубых погрешностей измерений по критерию Граббса и однородности дисперсий опытов по критерию Кохрена для экспериментов с равномерным дублированием опытов (для отклика y_2).

Точность проведенных расчетов подтверждена проверкой в программном пакете Statistica. На рисунке 4.15 приведен пример оценки эффектов для

отклика y_3 для образцов из древесины сосны. Красным шрифтом отмечены значимые эффекты.

Таблица 4.11 – Результаты реализации экспериментов по оценке глубины деформированной зоны и твердости дна проушины

Номер опыта	Сосна		Береза		Дуб	
	y_2	\bar{y}_3	y_2	\bar{y}_3	y_2	\bar{y}_3
1	70,59	187,88	133,33	200,00	200,00	150,00
2	85,71	140,00	105,88	186,81	158,33	136,48
3	62,50	172,97	104,00	210,45	178,57	175,00
4	100,11	200,00	106,25	182,61	100,00	164,86
5	94,12	202,78	250,00	175,68	54,55	176,92
6	80,06	168,57	100,00	162,16	155,56	168,29
7	70,59	125,00	125,00	215,63	90,91	187,50
8	114,29	157,89	84,85	205,56	70,27	161,54
9	53,33	161,33	-	-	-	-
10	100,03	200,00	-	-	-	-
11	100,00	182,05	-	-	-	-
12	55,56	168,29	-	-	-	-
13	64,29	200,00	-	-	-	-
14	92,86	167,50	-	-	-	-
15	98,95	202,63	-	-	-	-

Оценки эффектов; R-кв.=,95896;Скор.,92817 (Таблица данных_Усилие_твердость и глубина деф_зоны_Сосна-3 3-х уровневые ф, 1 Блоки; Остаточн.SS=40,87738 ЗП HRL, %										
Фактор	Эффект	Ст.Ош.	t(8)	p	-95, Дов.Пред	+95, Дов.Пред	Кэф.	Ст.Ош. Кэф.	-95, Дов.Пред	+95, Дов.Пред
Сред/Св.член	169,3153	1,773249	95,48304	0,000000	165,2261	173,4044	169,3153	1,773249	165,2261	173,4044
(1)W, %(L)	-17,6850	4,520917	-3,91182	0,004470	-28,1103	-7,2597	-8,8425	2,260458	-14,0551	-3,6299
W, %(K)	26,4140	3,317446	7,96216	0,000045	18,7640	34,0641	13,2070	1,658723	9,3820	17,0320
(3)B, мм(L)	21,5975	4,520917	4,77724	0,001396	11,1722	32,0228	10,7988	2,260458	5,5861	16,0114
B, мм(K)	22,1665	3,317446	6,68181	0,000156	14,5165	29,8166	11,0833	1,658723	7,2582	14,9083
1L на 2L	37,4550	6,393542	5,85826	0,000379	22,7115	52,1985	18,7275	3,196771	11,3557	26,0993
1L на 3L	23,5050	6,393542	3,67637	0,006252	8,7615	38,2485	11,7525	3,196771	4,3807	19,1243

Рисунок 4.15 – Оценки эффектов для отклика y_3 для образцов из древесины сосны

В результате получены уравнения регрессии (4.14) – (4.19):

- для образцов из древесины сосны (коэффициенты детерминации $R_2^2 = 0,81762$, $R_3^2 = 0,95896$):

$$y_2 = 79,14 - 6,78x_2 + 10,78x_3 - 4,24x_1^2 - 4,93x_2^2 - 5,00x_3^2 - 12,89x_1x_3 + 18,25x_2x_3, \quad (4.14)$$

$$y_3 = 169,32 - 17,69x_1 + 21,60x_3 + 26,41x_1^2 + 22,17x_3^2 + 37,45x_1x_2 + 23,51x_1x_3, \quad (4.15)$$

- из древесины березы ($R_2^2 = 0,95816$, $R_3^2 = 0,98306$):

$$y_2 = 126,14 - 26,94x_1 - 21,16x_2 - 13,77x_3 + 17,42x_1x_2 + 20,64x_1x_3 + 13,92x_2x_3, \quad (4.16)$$

$$y_3 = 192,36 - 8,07x_1 + 11,20x_2 - 9,64x_2x_3, \quad (4.17)$$

- из древесины дуба ($R_2^2 = 0,94006$, $R_3^2 = 0,94868$):

$$y_2 = 126,02 - 16,09x_2 + 33,20x_3 - 19,82x_1x_2 - 25,08x_1x_3, \quad (4.18)$$

$$y_3 = 165,07 - 7,28x_1 + 7,15x_2 - 8,49x_3 + 6,19x_2x_3. \quad (4.19)$$

Качество полученных моделей оценено на основе проверки нормальности распределения остатков и подтверждено высокими значениями коэффициентов детерминации R^2 .

Проверка адекватности моделей проведена по F-критерию Фишера с использованием формул (3.23) – (3.25), (3.32), (3.45) – (3.47). Для образцов из древесины сосны расчетные значения критерия составили $F_{p_2} = 19,18$; $F_{p_3} = 15,68$, $F_T = 19,3$. Для образцов из древесины березы $F_{p_2} = 8,46$, $F_{p_3} = 1,34$, $F_T = 9,1$, для образцов из древесины дуба $F_{p_2} = 1,58$, $F_{p_3} = 2,60$, $F_T = 9,1$. Условие $F_{p_i} < F_T$ выполнено, следовательно, модели, отклика y_i адекватны.

Переход от кодированных значений (x_1, x_2, x_3) к натуральным (W, h_n, B) осуществлен по формулам (4.4) – (4.6). Уравнения регрессии (4.14) – (4.19) преобразованы в уравнения зависимости относительной глубины деформированной зоны h_3 и твердости дна проушины HRL (HRM) от влажности, глубины и ширины проушины (4.20) – (4.25):

- для образцов из древесины сосны:

$$h_3 = 66,85 + 4,68h_n + 1,98B + 0,09W^2 - 1,00h_n^2 - 0,14B^2 - 0,25WB + 0,76h_n B, \quad (4.20)$$

$$HRL = 25,89 + 21,40W + 5,84B - 1,06W^2 - 0,35B^2 + 0,10Wh_n + 0,29WB, \quad (4.21)$$

- из древесины березы

$$h_3 = 860,4975 - 73,4437W - 67,47471h_n - 20,7056B + 5,8062Wh_n + 1,7203WB + 0,8702h_n B, \quad (4.22)$$

$$HRM = 201,84 - 5,39W + 5,74h_n - 0,01h_n B, \quad (4.23)$$

- из древесины дуба

$$h_3 = 156,65 - 29,36h_n + 22,23B + 2,33Wh_n - 2,26WB, \quad (4.24)$$

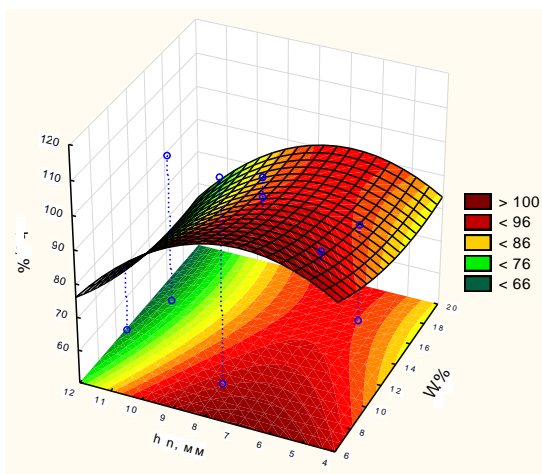
$$HRM = 246,75 - 7,28W - 1,43h_n - 4,93B + 0,52h_n B. \quad (4.25)$$

Полученные эмпирические модели (4.20) – (4.25) использованы далее в п. 4.5 для решения задачи оптимизации по определению рациональных значений параметров технологических режимов процесса торцового прессования элементов шиповых соединений.

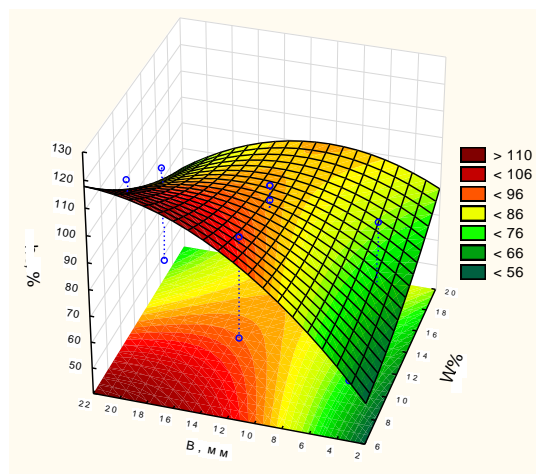
4.2.2 Анализ результатов экспериментальных исследований по определению глубины деформированной зоны и твердости дна проушины

Полученные модели (4.14) – (4.25) проанализированы путем исследования коэффициентов при факторах, графической интерпретации моделей в виде трех- и двухмерных графиков, изучены карты Парето для эффектов (факторов), отражающих их значимость факторов.

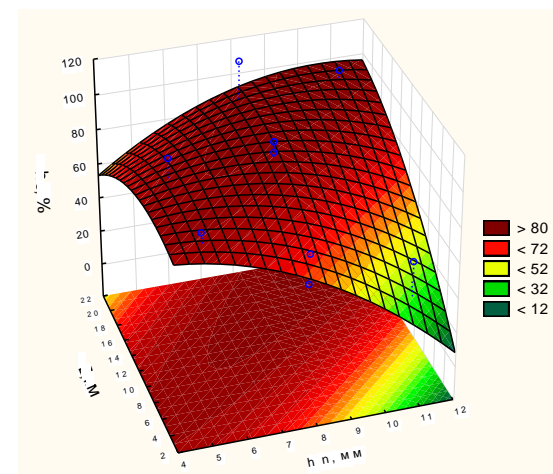
На рисунках 4.16 – 4.19 представлены примеры графической интерпретации моделей (4.20) – (4.25) в виде графиков зависимости глубины деформированной зоны h_3 и твердости дна проушины HRL (HRM) от влажности древесины W , ширины B и глубины h_n проушины для исследованных пород. На рисунке 4.20 в качестве примера приведены карты Парето для факторов, влияющих на твердость дна проушин, построенные для моделей (4.15), (4.17), (4.19).



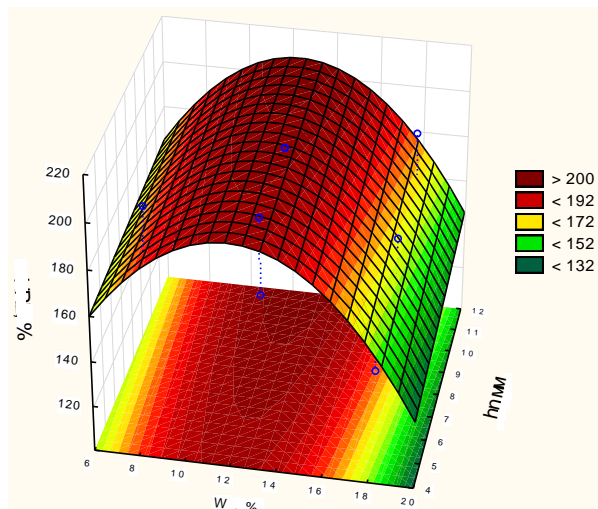
a



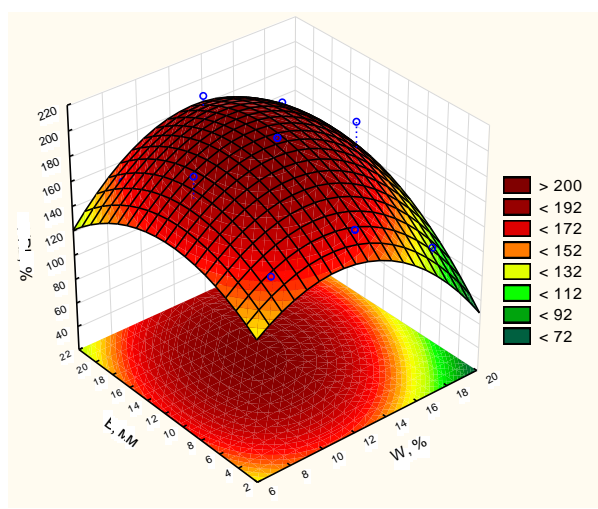
б



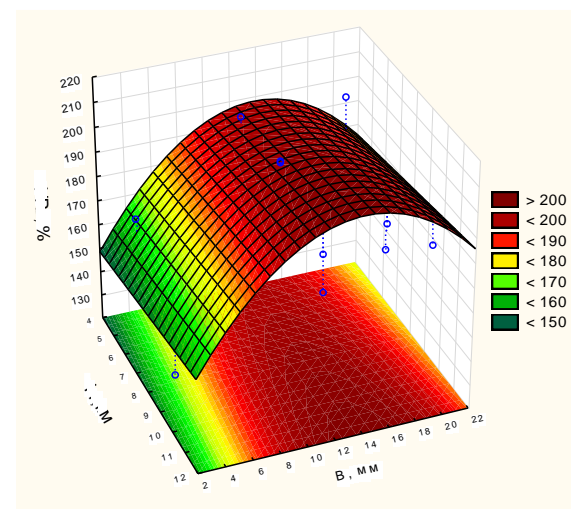
в



г



д



е

Рисунок 4.16 – Зависимость глубины деформированной зоны h_3 (*a* – *в*) и твердости дна проушины *HRL* (*г* – *е*) в древесине сосны: *a*, *г* – от глубины проушины h_n и влажности W при ширине проушины $B = 12$ мм; *б*, *д* – от B и W при $h_n = 8$ мм; *в*, *е* – от B и h_n при $W = 13$ %

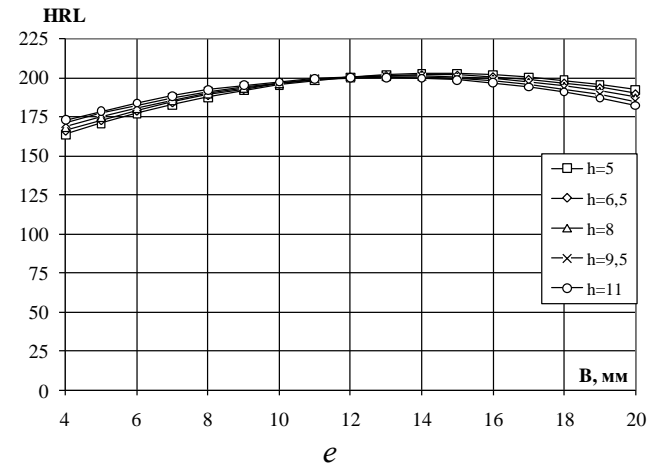
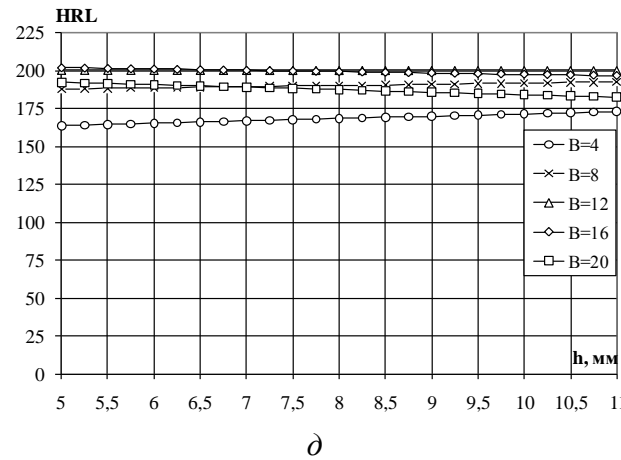
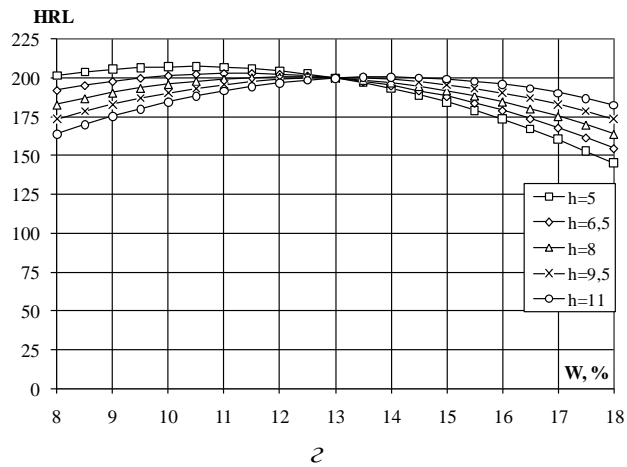
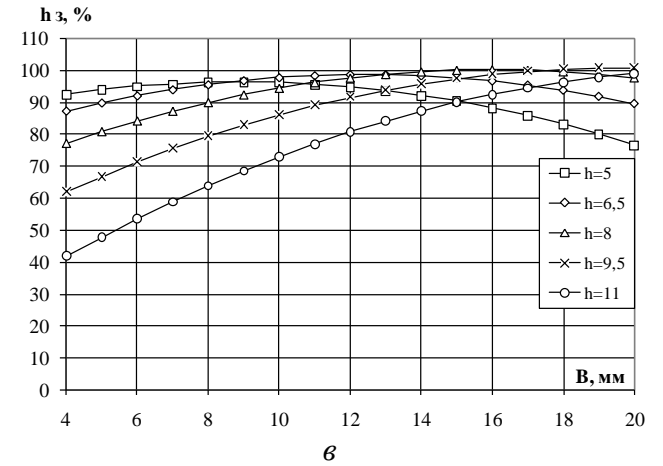
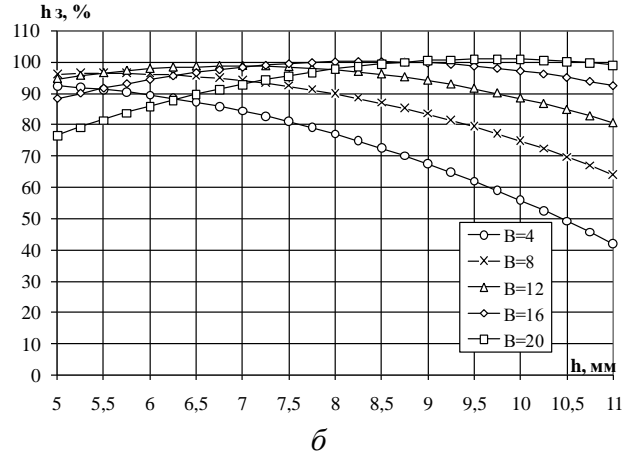
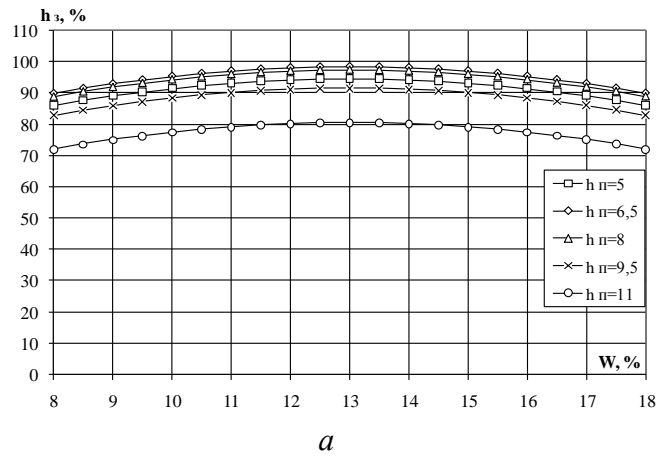
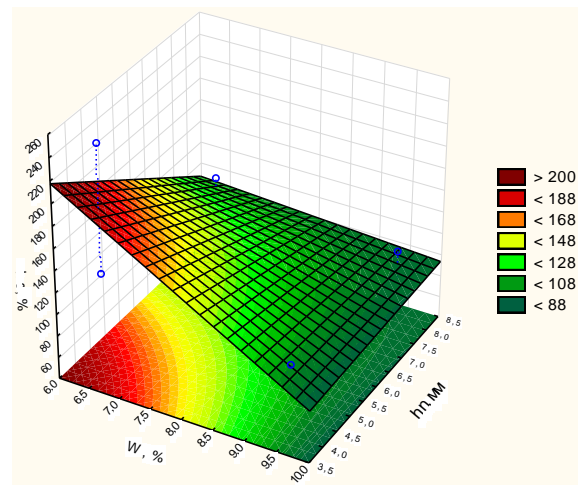
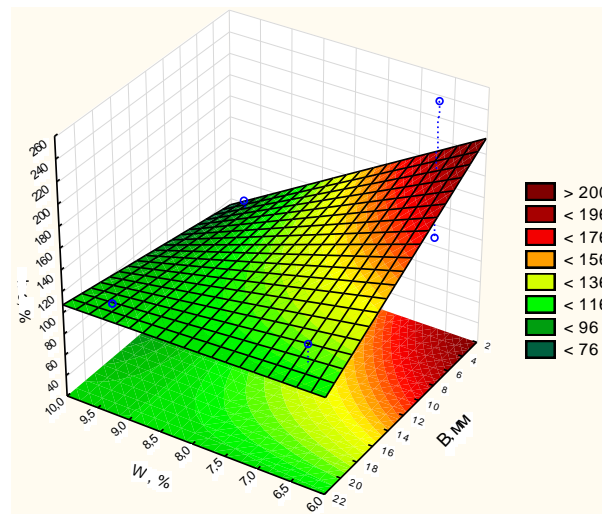


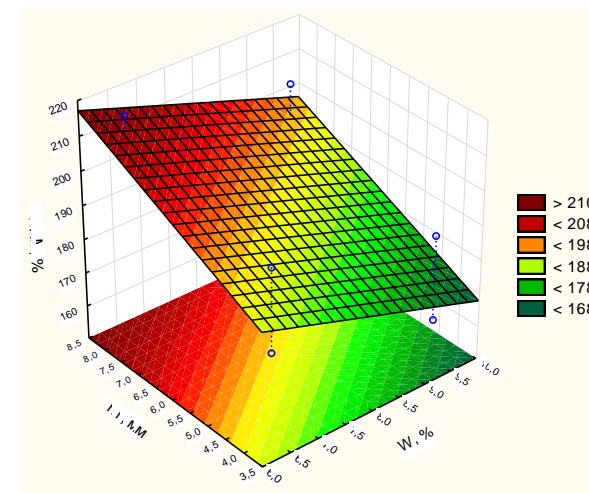
Рисунок 4.17 – Зависимость глубины деформированной зоны h_3 (а – в) и твердости дна проушины HRL (г – е) в древесине сосны: а, г – от W при $B = 12$ мм; б, д – от h_n при $W = 13$ %; в, е – от B при $W = 13$ %



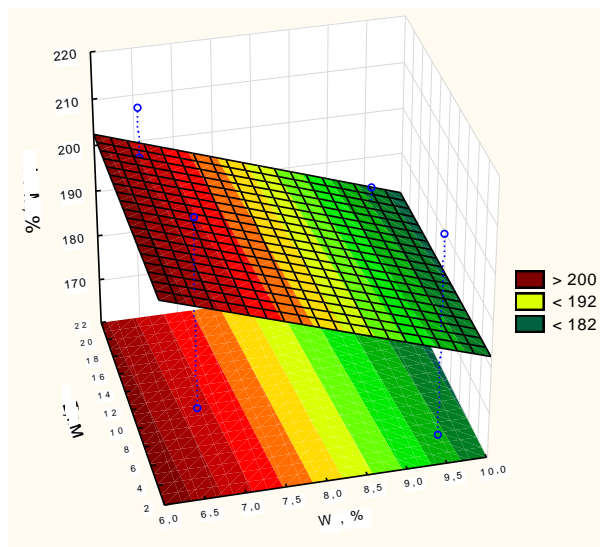
а



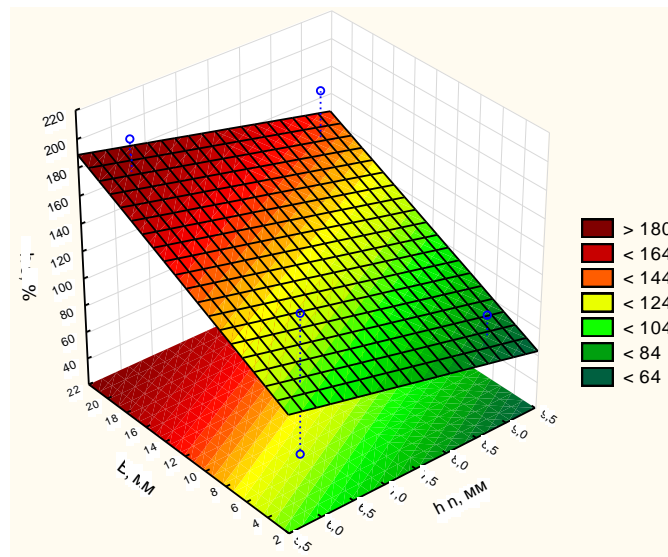
б



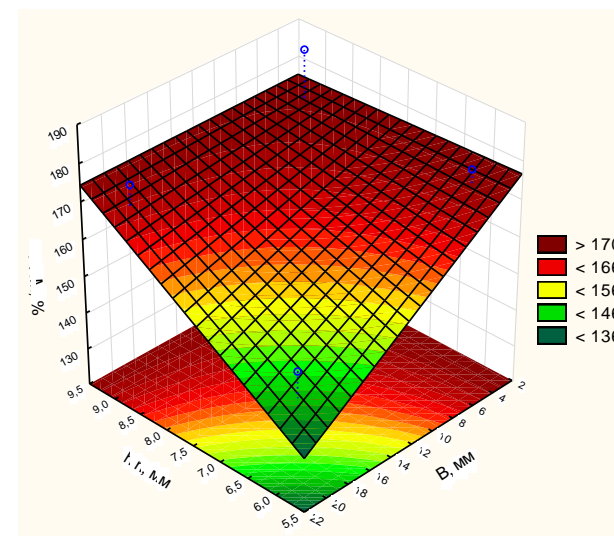
в



г



д



е

Рисунок 4.18 – Зависимость глубины деформированной зоны h_3 (а, б, д) и твердости дна проушины HRL (в, г, е) в древесине березы (а – г) и дуба (д, е): а, в – от h_n и W при $B = 12$ мм; б, д – от B и W при $h_n = 6$ мм; д, е – от B и h_n при $W = 8$ %

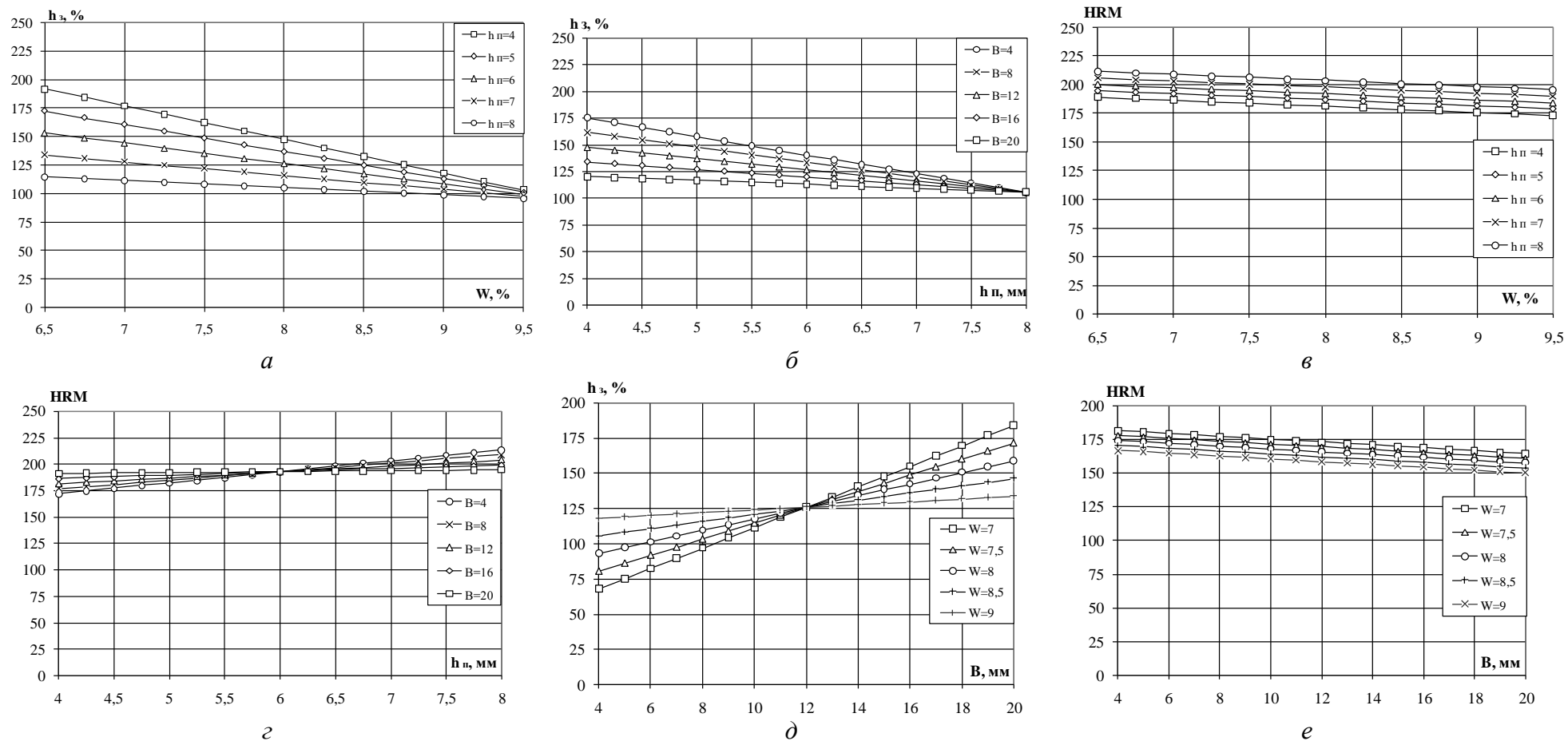
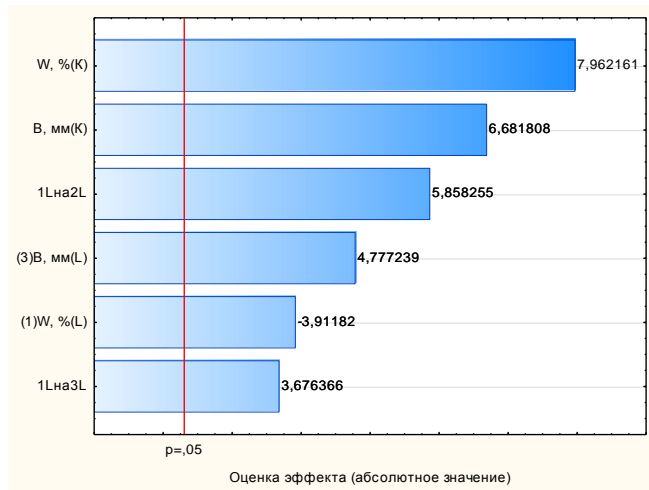
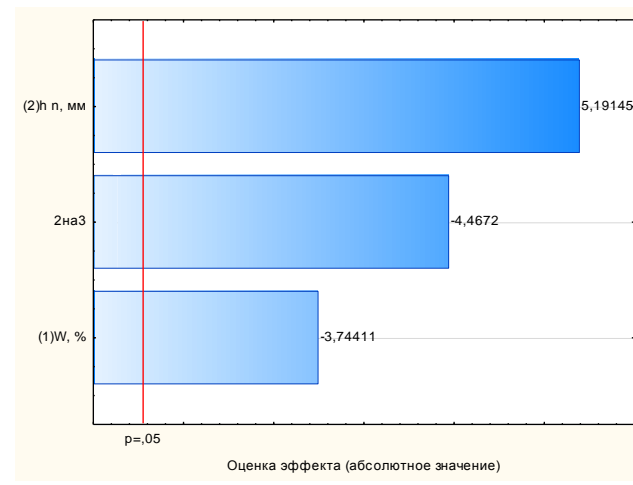


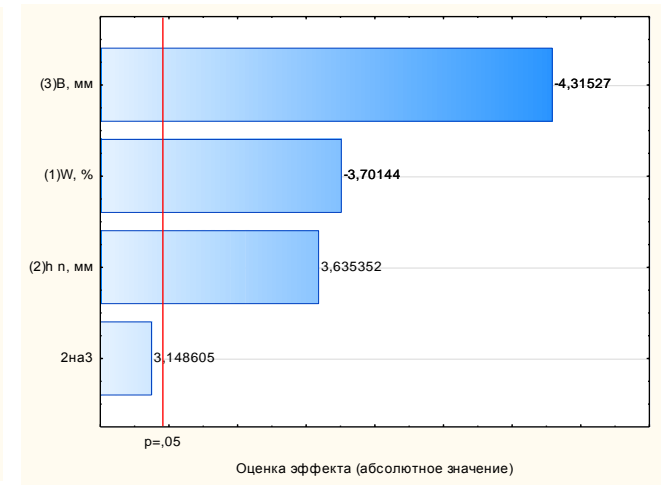
Рисунок 4.19 – Зависимость глубины деформированной зоны h_3 ($a, б, д$) и твердости дна проушины HRM ($в, г, е$) в древесине березы ($a - г$) и дуба ($д, е$): $a, в$ – от W при $B = 12$ мм; $б, д$ – от h_n при $W = 8$ %; $д, е$ – от B при $W = 8$ %



a



б



в

Рисунок 4.20 – Карты Парето для факторов модели отклика y_3 : *a* – сосна, *б* – береза; *в* – дуб

В результате анализа уравнений (4.20) – (4.25) и построенных графиков отмечено следующее:

- для древесины сосны наиболее значимым фактором по степени влияния на глубину деформированной зоны является ширина проушины, наиболее значимым фактором по степени влияния на твердость дна проушины – влажность;

- для древесины березы наиболее значимым фактором по степени влияния на глубину деформированной зоны является влажность, наиболее значимым фактором по степени влияния на твердость дна проушины – глубина проушины;

- для древесины дуба наиболее значимым фактором по степени влияния на глубину деформированной зоны и твердость дна проушины является ширина проушины;

- наилучшие значения каждого из откликов для каждой из рассматриваемых пород наблюдаются при различных сочетаниях факторов; для поиска сочетаний факторов, обеспечивающих оптимальные значения откликов, необходимо использование методов оптимизации.

4.3 Решение задачи оптимизации по определению рациональных значений параметров режимов прессования

В результате проведенных исследований установлено, что наиболее существенными параметрами технологического режима (управляющими факторами), влияющими на процесс местного торцового прессования, являются влажность древесины W , ширина B и глубина h_n формируемых проушин. К основным выходным характеристикам процесса относятся энергосиловой показатель – усилие прессования проушин F_e и показатели качества обработки: характеристика увеличения твердости дна проушин HRL (HRM) и глубина деформированной зоны h_3 . Схема математического описания объекта оптимизации представлена на рисунке 4.1.

Целью исследования является определение рациональных значений параметров процесса торцового прессования прямоугольных проушин в заготовках из древесины типичных пород: хвойной (сосны), лиственной рассеянно-сосудистой (березы), лиственной кольцесосудистой (дуба).

Организация условий для экономного расходования ресурсов при высоком качестве выполнения технологических операций относится к стратегически важным направлениям развития деревообрабатывающего производства. Промышленное внедрение нового способа требует обоснованного выбора параметров технологических режимов процесса, обеспечивающих высокое качество обработки при минимальных ресурсных затратах. Компромиссное решение по нахождению рациональных значений параметров режимов прессования проушин должно быть найдено с учетом указанных входных и выходных параметров. В этой связи цель проводимой оптимизации состоит в обеспечении минимальных энергосиловых затрат процесса прессования при максимальных значениях показателей качества обработки:

$$\begin{cases} F_e \rightarrow \min \\ h_3 \rightarrow \min \\ HRL \rightarrow \max \end{cases} \quad (4.26)$$

Усилие прессования F_e влияет на энергосиловые затраты процесса, его величина должна быть минимальной. Твердость дна проушин HRL влияет на впитываемость клея [202, 225] и вследствие этого на его расход и прочность клеевого соединения. Значение твердости должно быть максимальным. Глубина деформированной зоны h_3 влияет на эстетическую оценку зоны клеевого шва, в связи с чем желательна ее минимизация.

На первом этапе поиска рациональных значений параметров процесса произвели поиск экстремальных значений для каждой из функций (4.7) – (4.9) и (4.20) – (4.25). Отметим, что для поиска решений использовали уравнения в натуральном виде, поскольку это позволяет непосредственно оценивать полученные значения управляющих и выходных факторов, без дополнительной операции их перевода из кодированной формы в натуральную.

В оптимизационные модели (4.27) – (4.29) включили целевую функцию и ограничения на входные параметры (на примере для древесины сосны):

$$\begin{cases} F_{es} \rightarrow \min \\ 8 \leq W \leq 18 \\ 4 \leq B \leq 20 \\ 5 \leq h_n \leq 11 \end{cases}, \quad (4.27)$$

$$\begin{cases} HRL \rightarrow \max \\ 8 \leq W \leq 18 \\ 4 \leq B \leq 20 \\ 5 \leq h_n \leq 11 \end{cases}, \quad (4.28)$$

$$\begin{cases} h_3 \rightarrow \min \\ 8 \leq W \leq 18 \\ 4 \leq B \leq 20 \\ 5 \leq h_n \leq 11 \end{cases}. \quad (4.29)$$

Поиск экстремальных значений F_e , h_3 , HRL (HRM) выполнили по методу обобщенного приведенного градиента (ОПГ) в программном пакете Microsoft Excel с использованием надстройки «Поиск решения». Для каждой из трех целевых функций (по каждой из исследуемых пород) было определено оптимальное значение (отмеченные зеленым цветом ячейки на рисунке 4.21) с учетом ограничений (рисунок 4.22) для переменных (отмеченные желтым цветом ячейки на рисунке 4.21).

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	
1												
2		$F_{es} = 9625,88 - 928,03W - 1430,17h_n + 2068,89B + 28,97W^2 + 61,40h_n^2 +$										
3		$+ 45,76Wh_n - 68,03WB$									F_{es}	МИНИМУМ
4										4129,505		
5		Значения переменных		Ограничения								
6				min	max							
7		W	16,3180548	8	18							
8		h _n	5,565601068	5	11							
9		B	4	4	20							
10												
11												
12		$h_3 = 66,85 + 4,68h_n + 1,98B + 0,09W^2 - 1,00h_n^2 - 0,14B^2 -$										
13		$- 0,25WB + 0,76h_nB$									h_3s	МИНИМУМ
14										33,41096		
15												
16		Значения переменных		Ограничения								
17				min	max							
18		W	8	8	18							
19		h _n	11	5	11							
20		B	4	4	20							
21												
22												
23		$HRL = 25,89 + 21,40W + 5,84B - 1,06W^2 - 0,35B^2 + 0,10Wh_n + 0,29WB$									HRL	МАКСИМУМ
24										207,0068		
25												
26		Значения переменных		Ограничения								
27				min	max							
28		W	12,54492115	8	18							
29		h _n	11	5	11							
30		B	13,75567099	4	20							
31												
32												
33												

Рисунок 4.21 – Результаты решения оптимизационных задач для трех выходных параметров в программе Microsoft Excel (на примере сосны)

На рисунке 4.22 приведен пример задания ограничений для целевой функции (4.22), на рисунке 4.23 – пример программного отчета.

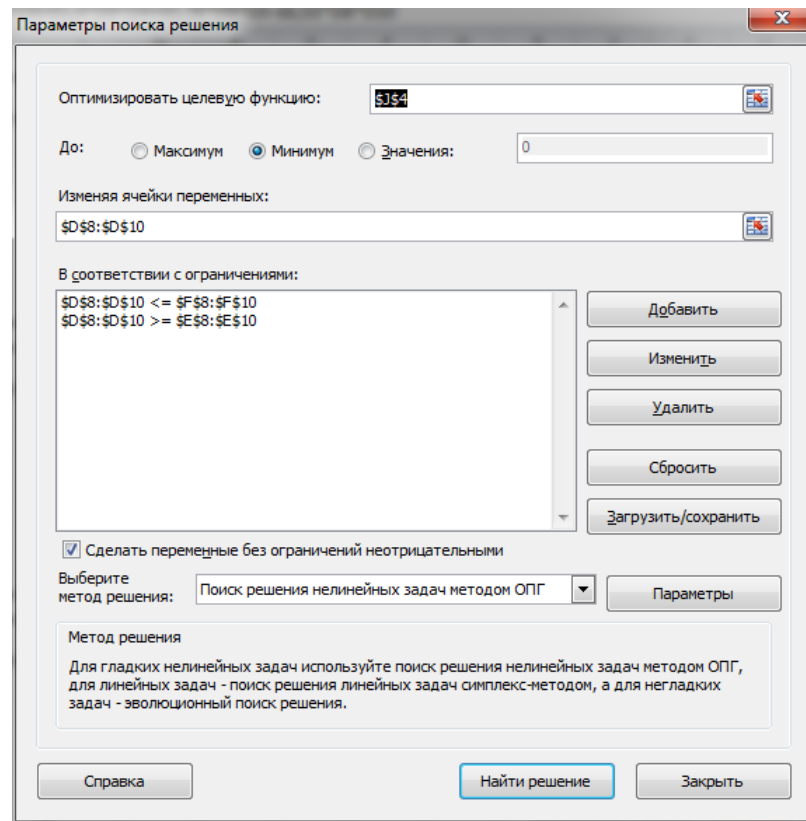


Рисунок 4.22 – Пример задания ограничений для целевой функции F_{es} в диалоговом окне «Поиск решения»

Целевая функция							
Ячейка	Имя	Значение					
\$J\$4	Fes	4129,5054					
Переменная			Нижний	Целевая функция	Верхний	Целевая функция	
Ячейка	Имя	Значение	Предел	Результат	Предел	Результат	
\$D\$8	W	16,318055	8	6133,940756	18	4211,459805	
\$D\$9	hn	5,5656011	5	4149,147564	11	5942,812689	
\$D\$10	B	4	4	4129,505423	20	19469,86914	

Рисунок 4.23 – Пример программного отчета о пределах для целевой функции F_{es} (сосна)

Результаты оптимизации режимов прессования по частным критериям (4.27) – (4.29) для исследуемых пород приведены в таблице 4.12.

Таблица 4.12 – Экстремальные значения критериев F_e , h_3 , HRL (HRM)

Порода	Критерий	Единица измерения	Значение	
			min	max
Сосна	F_{es}	Н	4129,51	30763,27
	HRL_s	%	116,49	207,01
	h_{3s}	%	33,41	112,79
Береза	F_{eb}	Н	6658,92	33600,44
	HRM_b	%	172,79	212,41
	h_{3b}	%	74,65	240,00
Дуб	F_{ed}	Н	10707,82	50596,27
	HRM_d	%	136,45	181,92
	h_{3d}	%	64,84	107,14

В целом полученные решения согласуются с результатами анализа экспериментальных регрессионных зависимостей и их графических представлений (п. 4.1.3, п. 4.2.2). Однако это все еще не позволяет дать рекомендации по рациональным режимам прессования проушин, поскольку дифференцированный поиск оптимумов по трем целевым функциям дает несогласующиеся результаты: управляющие параметры присутствуют как на нижней, так и на верхней границе диапазона варьирования (рисунок 4.21, таблица 4.13).

Таблица 4.13 – Результаты оптимизации по частным критериям (сосна)

Целевая функция	Значения управляющих факторов			Значение целевой функции
	W , %	h_n , мм	B , мм	
$F_{es} \rightarrow \min$	16,3	5,6	4,0	4129,51 Н
$HRL \rightarrow \max$	12,5	11,0	13,8	207,01 %
$h_n \rightarrow \min$	8,0	11,0	4,0	33,41 %

Поэтому совокупность моделей (4.27) – (4.29) должна быть преобразована в единую оптимизационную модель. Целевая функция, разработанная по принципу справедливого компромисса на основе соотношений (3.49) и

(4.26), и набор ограничений составили в совокупности оптимизационную модель:

$$\left\{ \begin{array}{l} \frac{F_{en} \cdot h_{3n}}{HRL_n} \rightarrow \min \\ W_{\min} \leq W \leq W_{\max} \\ B_{\min} \leq B \leq B_{\max} \\ h_{n\min} \leq h_n \leq h_{n\max} \end{array} \right., \quad (4.30)$$

где F_{en} , h_{3n} , HRL_n (для березы и дуба – HRM_n) – нормированные значения критериев, определяемые по соотношению (3.50) с учетом экстремальных значений функций, приведенных в таблице 4.12; например, для сосны:

$$F_{esn} = \frac{F_{es} - F_{es\min}}{F_{es\max} - F_{es\min}} = \frac{F_{es} - 4129,51}{30763,27 - 4129,51} = \frac{F_{es} - 4129,51}{26633,76}. \quad (4.31)$$

Поиск компромиссного решения по нахождению рациональных значений параметров режимов также осуществлен по методу ОПГ. Процедура оптимизации вновь реализована в программном пакете Microsoft Excel с использованием надстройки «Поиск решения» (рисунки 4.24, 4.25).

52	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L
53												
54								Fes*h3/HRL	целевая функция			
55										0	минимум	
56												
57									натур	нормир		
58			0	Ограничения	0			Fes	5878,73	0,065676956		
59			0	min	max			h3	33,41096	0		
60		W	8		8	18		HRL	165,24618	0,53863858		
61		hn	11		5	11						
62		B	4		4	20						
63												
64												

Рисунок 4.24 – Результаты решения оптимизационной задачи для обобщенной целевой функции (на примере сосны)

	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	
1	Microsoft Excel 14.0 Отчет о пределах										
2	Лист: [4.5 Рациональные значения параметров процесса.xlsx]Сосна Справедливый компромисс										
3	Отчет создан: 13.08.2020 21:14:17										
4											
5											
6	Целевая функция										
7	Ячейка	Имя	Значение								
8	\$J\$45	целевая функ	2,18295E-17								
9											
10											
11	Переменная			Нижний	Целевая функция	Верхний	Целевая функция				
12	Ячейка	Имя	Значение	Предел	Результат	Предел	Результат				
13	\$D\$50	W	8	8	2,18295E-17	18	0,117345205				
14	\$D\$51	hn	11	5	0,108833986	11	2,18295E-17				
15	\$D\$52	B	4	4	2,18295E-17	20	1,867747654				
16											

Рисунок 4.25 – Пример программного отчета о пределах для обобщенной целевой функции (сосна)

Результаты решения задачи оптимизации (4.31) для трех исследуемых пород приведены в таблице 4.14.

Таблица 4.14 – Результаты решения оптимизационной задачи

Порода	Оптимальные значения управляющих факторов			Ожидаемые значения управляемых параметров		
	W , %	h_n , мм	B , мм	F_e , Н	h_3 , %	HRL (HRM), %
Сосна	8	11	4	5878,73	33,41	165,25
Береза	9,5	8	4	8419,00	74,65	196,24
Дуб	7	9	4	11246,72	64,84	181,92

Обобщая результаты, полученные для исследованных пород, отметили следующее:

- рекомендуемые значения влажности W находятся в пределах 7 – 9,5 %, что указывает на целесообразность проведения обработки при влажности заготовок, близкой к эксплуатационной, для изделий, предназначенных для использования внутри помещений;

- значение глубины h_n прессуемых проушин может быть принято максимальным из исследуемого диапазона. Это дает возможность без суще-

ственного увеличения энергозатрат и снижения качества обработки изготавливать шипы с увеличенной длины, что повышает прочность соединения [308, 316, 325, 341, 365, 382, 391];

- оптимальное значение управляющего фактора «ширина проушины» $B = 4$ мм расположено на нижней границе диапазона варьирования, что указывает на перспективы изготовления шипов малых толщин.

На этом основании, используя прогнозные свойства моделей (4.7) – (4.9) и (4.20) – (4.25), расширили диапазон варьирования ширины проушины в направлении тренда оптимизации: $B = 1 \div 20$ мм. Поиск решения по методу ОПГ вновь показал результат на границе диапазона (рисунок 4.26): оптимальное значение B снизилось до 3,3 мм, т.е. целевая функция имеет потенциал в данном направлении. Этот результат значим для конструирования соединений: многократные шипы малых толщин (порядка 2 – 4 мм) могут эффективно использоваться для сращивания по длине.

Целевая функция							
Ячейка	Имя	Значение					
\$J\$53	целевая функ	-0,010684					

Переменная			Нижний	Целевая функция	Верхний	Целевая функция
Ячейка	Имя	Значение	Предел	Результат	Предел	Результат
\$D\$58	W	6	6	-0,01068411	18	0,155160534
\$D\$59	hn	11	5	0,183076696	11	-0,01068411
\$D\$60	B	3,2681666	1	0,209142069	20	5,377772523

Рисунок 4.26 – Результаты решения оптимизационной задачи для обобщенной целевой функции при расширении диапазона варьирования управляющих параметров (на примере сосны)

При этом диапазон варьирования влажности также был расширен в направлении нижней границы (для сосны $W = 6 - 18$ %), и результат оптимизации подтвердил рациональность обработки сухих заготовок с влажностью 6 %.

Вывод. Определенные в результате решения задачи оптимизации значения параметров процесса могут быть использованы для реализации технологии торцового прессования элементов шиповых соединений в промышленных условиях. Полученные значения управляющих фактов W , h_n , B необходимы для проектирования соединений и организации технологического процесса, значения выходных параметров (управляемых параметров) F_e , h_3 , HRL (HRM) – для планирования затрат и прогнозирования полученного результата.

4.4 Экспериментальная оценка влияния параметров режима прессования многократных шипов на энергосиловые показатели процесса

Выше в разделе 3 и п. 4.1 показано, что усилие торцового прессования одинарных проушин зависит от физико-механических характеристик древесины, размеров сечения заготовок, размеров формируемых проушин. Аналитически и экспериментально установлено, что при прессовании одной проушины в заготовках из одной породы древесины, при одинаковых размерах поперечного сечения, наиболее значимыми факторами являются ширина проушин B и влажность древесины W . В случае изготовления многократных шипов на торцах заготовок одного и того же сечения изменение величины зазора (натяга) прямо пропорционально влияет на ширину формируемых проушин. Следовательно, влияние изменения величины зазора (натяга) можно косвенно оценить по полученной в п. 4.1.4 модели (4.13).

Для целей прогнозирования усилия прессования в производственных условиях, при обработке заготовок с заданными размерами и влажностью, изменяющимися в пределах допускаемых отклонений, требуется проведение дополнительных исследований. При относительно стабильных размерах и влажности партии заготовок важно оценить влияние вновь вводимых в исследовании факторов – высоты шипа и величины зазора (натяга).

Цель исследования – установить степень влияния параметров технологических режимов на усилие торцового прессования многократных прямоугольных шипов (проушин) в узком диапазоне изменения размеров и влажности заготовки в пределах допускаемых отклонений, с варьированием высоты шипов и величины натяга.

Задачи исследования:

- исследовать зависимость усилия прессования от параметров технологических режимов – ширины B_3 и толщины S заготовки, влажности древесины W , высоты шипа h_n , величины зазора (натяга) N ;
- разработать рекомендации по возможностям варьирования параметров соединения в целях проектирования промышленных технологий.

4.4.1 Результаты исследований по оценке влияния параметров технологических режимов на усилие прессования многократных проушин

Методика исследований приведена в п. 3.4.1. Результаты экспериментальных исследований приведены в таблице 4.15.

Статистическая обработка данных проведена с использованием программного пакета Statistica по методике, описанной в п. 3.5.2.4.

Таблица 4.15 – Результаты исследований влияния параметров режима на усилие прессования многократных проушин

Номер образца	Ширина заготовки B , мм	Толщина заготовки S , мм	Влажность W , %	Высота шипа h , мм	Величина зазора / натяга N , мм	Усилие прессования F , Н
1	40,25	24,15	5,5	9,60	0,2	29420
2	40,05	23,75	5,5	9,60	0,2	29420
3	39,75	23,80	5,4	7,40	0,1	33343
4	39,90	24,45	5,0	7,40	0,1	35304
5	40,15	24,30	5,3	8,50	0	33343
6	40,10	24,40	5,4	8,50	0	29420
7	39,85	23,75	5,5	7,60	-0,1	36285
8	40,30	24,65	5,7	7,60	-0,1	34323
9	40,10	24,20	5,6	9,70	0,2	39227
10	39,40	24,15	5,2	9,70	0,2	34323
11	40,10	23,90	5,8	7,90	0,1	35304
12	39,45	24,75	5,4	7,90	0,1	34323
13	39,55	24,50	5,6	9,60	0	33343
14	40,20	24,15	5,7	9,70	0	33343
15	40,50	23,65	6,3	8,15	-0,1	34323
16	39,65	24,45	5,2	8,40	-0,1	37265
17	39,50	24,10	6,5	10,00	0,2	35304
18	39,50	23,80	7,2	10,00	0,2	33343
19	40,10	24,50	6,8	8,00	0,1	32362
20	40,10	24,35	7,1	8,00	0,1	33343

Номер образца	Ширина заготовки B , мм	Толщина заготовки S , мм	Влажность W , %	Высота шипа h , мм	Величина зазора / натяга N , мм	Усилие прессования F , Н
21	40,00	24,30	7,4	9,40	0	33343
22	40,25	24,00	6,5	9,40	0	35304
23	40,00	23,95	7,2	8,30	-0,1	35304
24	39,80	24,60	7,2	8,30	-0,1	31381
25	39,60	25,65	5,4	9,00	0,2	36285
26	39,80	24,50	5,3	9,40	0,2	33343
27	39,00	24,00	5,1	7,70	0,1	33343
28	39,50	24,75	5,3	7,70	0,1	34323
29	39,30	24,10	5,2	10,00	0	39227
30	39,70	24,45	5,0	10,00	0	35304
31	40,50	23,70	5,0	7,80	-0,1	37265
32	39,90	24,45	5,0	7,80	-0,1	29420
33	40,80	23,45	5,0	9,40	0,2	31381
34	39,50	24,90	4,8	9,40	0,2	29420
35	40,20	24,30	4,8	7,80	0,1	32362
36	40,05	24,35	5,1	7,80	0,1	34323
37	40,45	24,05	5,1	9,50	0	34323
38	41,10	25,25	5,0	9,50	0	34323
39	41,25	25,70	5,1	8,10	-0,1	35304
40	41,00	25,45	5,1	8,10	-0,1	32362
41	41,15	23,80	5,3	10,00	0,2	33343

Номер образца	Ширина заготовки B , мм	Толщина заготовки S , мм	Влажность W , %	Высота шипа h , мм	Величина зазора / натяга N , мм	Усилие прессования F , Н
42	41,00	23,70	5,7	10,00	0,2	32362
43	41,10	24,50	4,8	8,40	0,1	36285
44	41,20	25,50	5,2	8,40	0,1	35304
45	40,85	24,10	5,7	10,30	0	33343
46	41,20	24,05	5,0	10,30	0	34323
47	40,65	25,30	5,0	8,10	-0,1	31381
48	40,85	24,40	5,6	8,10	-0,1	33343
49	41,25	25,05	5,1	8,50	0,2	32362
50	41,00	24,65	6,1	8,80	0,2	33343
51	39,30	24,15	4,9	7,80	0,1	35304
52	40,90	24,70	6,2	7,80	0,1	40207
53	39,50	23,45	5,4	8,00	0	32362
54	40,90	23,70	5,4	8,60	0	34323
55	39,15	24,40	5,7	8,10	-0,1	32362
56	40,90	24,05	6,0	8,10	-0,1	33343
57	40,00	24,10	5,2	8,00	0,2	32362
58	40,05	24,40	5,0	8,00	0,2	34323
59	40,90	24,05	4,7	8,10	0,1	34323
60	41,05	24,00	4,7	8,10	0,1	33343
61	40,75	25,25	5,0	8,10	0	34323
62	40,10	24,20	4,9	8,10	0	30401

Номер образца	Ширина заготовки B , мм	Толщина заготовки S , мм	Влажность W , %	Высота шипа h , мм	Величина зазора / натяга N , мм	Усилие прессования F , Н
63	41,15	24,70	4,8	7,50	-0,1	37265
64	39,00	24,00	5,2	7,50	-0,1	34323
65	40,85	25,10	5,1	7,80	0,2	32362
66	38,80	23,80	5,0	7,80	0,2	30401
67	41,05	24,00	5,2	8,00	0,2	33343
68	40,20	24,50	5,0	8,20	0,2	30401
69	39,50	23,10	5,5	8,00	0,1	33343
70	39,30	24,45	5,3	8,00	0,1	35304
71	39,40	24,60	5,2	8,00	0,1	35304
72	40,60	24,55	5,2	7,80	0,1	36285
73	39,90	23,65	5,4	8,30	0	33343
74	40,80	24,55	5,7	8,40	0	31381
75	39,55	24,25	5,0	8,30	0	33343
76	40,20	24,60	5,2	8,30	0	32362
77	41,35	24,70	4,9	8,30	-0,1	36285
78	40,30	23,75	5,3	8,30	-0,1	34323
79	40,50	23,65	5,3	8,45	-0,1	38246
80	40,95	23,70	5,2	7,95	-0,1	35304
81	39,55	23,95	6,1	7,65	0,2	31381
82	39,70	24,00	5,8	5,50	0,2	29420
83	40,85	24,05	5,8	6,15	0,1	31381

Номер образца	Ширина заготовки B , мм	Толщина заготовки S , мм	Влажность W , %	Высота шипа h , мм	Величина зазора / натяга N , мм	Усилие прессования F , Н
84	39,15	23,70	6,4	6,50	0,1	34323
85	39,55	23,45	6,1	5,50	0	29420
86	39,75	23,05	5,7	5,50	0	30401
87	39,45	24,65	6,1	6,40	-0,1	29420
88	40,90	23,40	6,5	6,20	-0,1	32362
89	40,70	24,60	5,8	6,50	0,2	31381
90	41,35	24,00	5,8	6,50	0,2	34323
91	40,05	24,35	5,7	6,30	0,1	33343
92	40,05	24,40	5,2	6,30	0,1	32362
93	40,35	24,30	5,6	5,70	0	31381
94	40,45	24,25	5,6	5,70	0	32362
95	40,65	24,70	5,3	5,85	-0,1	29420
96	40,45	23,55	4,9	5,85	-0,1	28439
97	39,45	23,50	5,3	10,30	0,2	35304
98	39,65	24,10	5,7	10,30	0,2	37265
99	40,25	24,00	5,4	7,70	0,1	35304
100	40,00	23,80	5,5	7,70	0,1	35304
101	40,10	23,80	4,8	7,90	0	36285
102	40,55	24,05	5,4	7,90	0	35304

4.4.2 Корреляционный анализ

Для проверки факторов на мультиколлинеарность рассмотрена корреляционная матрица, построенная в Statistica (рисунок 4.27).

Переменная	Корреляции (Прочность соединений с посадками)					
	Ширина заготовки, мм	Толщина заготовки, мм	Величина зазора / натяга, мм	Влажность, %	Высота шипа, мм	Усилие прессования, Н
Ширина заготовки, мм	1,000000	0,228712	-0,132751	-0,149237	0,008521	0,073051
Толщина заготовки, мм	0,228712	1,000000	-0,023834	-0,182404	0,077004	0,064753
Величина зазора / натяга, мм	-0,132751	-0,023834	1,000000	-0,028751	0,222672	-0,063422
Влажность, %	-0,149237	-0,182404	-0,028751	1,000000	-0,018155	-0,044519
Высота шипа, мм	0,008521	0,077004	0,222672	-0,018155	1,000000	0,319926
Усилие прессования, Н	0,073051	0,064753	-0,063422	-0,044519	0,319926	1,000000

Рисунок 4.27 – Корреляционная матрица

Коэффициенты парной корреляции между независимыми переменными имеют значения не более 0,23 по модулю. Условием наличия мультиколлинеарности является значение коэффициента более 0,7; следовательно, мультиколлинеарность не наблюдается, и в дальнейшем анализе могут участвовать все факторы. Наибольшая корреляция между независимыми переменными и зависимой переменной «Усилие прессования» наблюдается у переменной «Высота шипа»: коэффициент корреляции $\approx 0,32$. По общепринятой шкале квантификации тесноты связи это слабая связь; по шкале для технических измерений, предложенной в работе [140], это «слабоватая» связь, ниже средней, по шкале Чеддока – «умеренная» [18]. Анализ слабых связей важен с точки зрения выявления не изученных ранее закономерностей [140], поэтому анализ был продолжен.

4.4.3 Линейный регрессионный анализ

4.4.3.1 Анализ остатков и оценка приемлемости модели.

При генерировании модели в виде множественной линейной регрессии с помощью стандартной процедуры получены данные, представленные на рисунке 4.28.

		Итоги регрессии для зависимой переменной: Усилие прессования, Н R= ,35446470 R2= ,12564522 Скоррект. R2= ,08010591 F(5,96)=2,7590 p<,02257 Станд. ошибка оценки: 2271,1					
N=102		БЕТА	Ст.Ош. БЕТА	В	Ст.Ош. В	t(96)	p-знач.
Св.член				20246,59	17194,31	1,17752	0,241900
Ширина заготовки, мм		0,042918	0,099599	159,88	371,03	0,43090	0,667506
Толщина заготовки, мм		0,019052	0,099518	86,80	453,41	0,19144	0,848586
Величина зазора / натяга, мм		-0,135622	0,098966	-2881,98	2103,04	-1,37039	0,173762
Влажность, %		-0,032225	0,097801	-129,96	394,41	-0,32950	0,742498
Высота шипа, мм		0,347707	0,098267	696,88	196,95	3,53839	0,000622

Рисунок 4.28 – Итоги множественной регрессии

Уравнение регрессии имеет вид (4.32):

$$F = 20246,59 + 696,88h_n - 2881,98N + 159,88B_3 - 129,96W + 86,80S \quad (4.32)$$

Качество полученной модели можно оценить на основе проверки нормальности распределения остатков (разности фактических значений отклика и значений, предсказанных по уравнению регрессии для одних и тех же факторов). Если линейная форма зависимости выбрана верно, то остатки регрессионной модели должны подчиняться нормальному распределению и не зависеть от предсказанных по регрессионной модели значений отклика (рисунок 4.29).

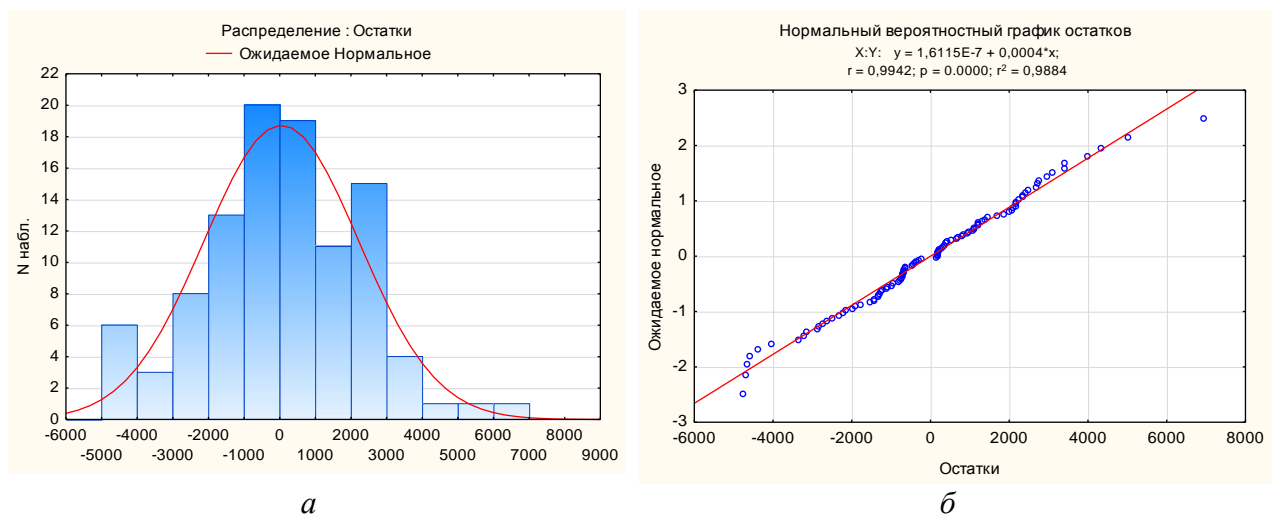


Рисунок 4.29 – Графическое представление нормальности распределения остатков: *a* – частотная гистограмма; *б* – нормально-вероятностный график

Частотная гистограмма остатков (рисунок 4.29 а) относительно симметрична, гипотеза о нормальности не отклоняется. На нормально-вероятностном графике (рисунок 4.29 б) серьезных систематических отклонений фактических данных от теоретической нормальной прямой практически не наблюдается. Остатки укладываются на нормальную прямую с высоким коэффициентом детерминации $R^2 = 0,9884$, следовательно, распределены нормально.

Проанализированы наличие или отсутствие зависимости остатков от предсказанных значений по диаграмме рассеяния (рисунок 4.30). Расположение точек достаточно хаотичное, что говорит об отсутствии зависимости остатков от предсказанных по уравнению регрессии значений отклика.

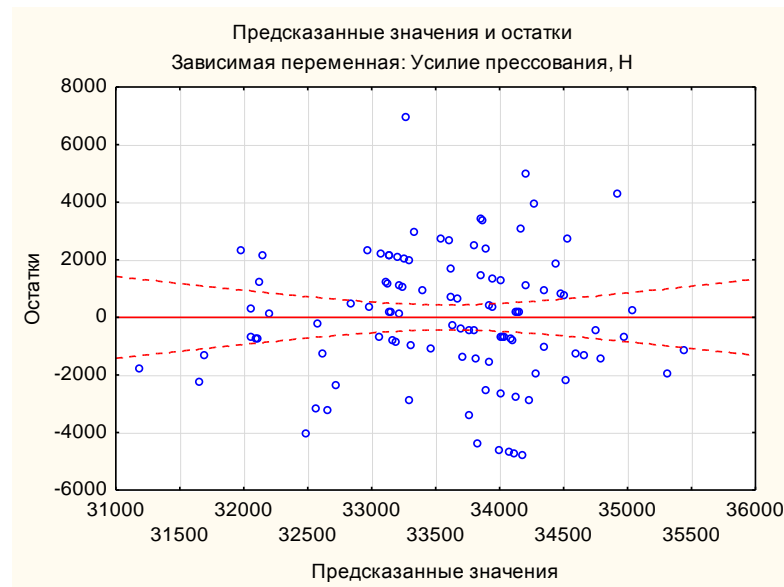


Рисунок 4.30 – Диаграмма рассеяния

В целом, по результатам анализа остатков, линейная форма зависимости выбрана обоснованно и полученная регрессионная модель должна работать достаточно качественно.

Оценен уровень значимости модели на основе результатов дисперсионного анализа (рисунок 4.31). По итогам дисперсионного анализа уровень значимости F -критерия меньше, чем заданный уровень значимости: $p = 0,02257 < 0,05$, следовательно, регрессия статистически значима. Ошибка прогноза по построенной модели будет меньше, чем при «наивном» прогнозе

по среднему значению, т.е. по данному критерию модель также можно считать приемлемой.

Эффект	Дисперсионный анализ; ЗП: Усилие прессования, Н				
	Сумма квадр.	сс	Средн. квадр.	F	р-знач.
Регресс.	71155527	5	14231105	2,759050	0,022570
Остатки	495165465	96	5157974		
Итого	566320993				

Рисунок 4.31 – Результаты дисперсионного анализа

4.4.3.2 Анализ регрессионного уравнения.

Бета-коэффициенты (рисунок 4.28) позволяют сравнить относительный вклад каждой независимой переменной в предсказание отклика. Из таблицы итогов регрессии (рисунок 4.28) и уравнения (4.32), в котором факторы расположены в порядке убывания значимости, видно, что наиболее важными предикторами для усилия прессования, в порядке убывания значимости, являются переменные *Высота шипа h_n* , *Величина зазора/натяга N* , *Ширина заготовки B_3* . Меньшее влияние на отклик оказывают факторы *Влажность W* и *Толщина S* заготовки.

Для уравнения регрессии статистически значим коэффициент фактора h_n : его уровень значимости $p = 0,000622 < 0,05$. Регрессионный коэффициент для данного фактора положителен: с увеличением h_n усилие прессования увеличивается. Степень влияния h_n невелика: так, при увеличении h_n на 1 мм усилие F увеличится на 696 Н, что составит чуть более 2 % от среднего значения F ; при увеличении h_n на 4 мм (например, с 6 до 10 мм) – усилие увеличится на 2788 Н (8 %).

Также на основании данной модели можно оценить искомое влияние на усилие прессования F изменения величины зазора (натяга) N : при увеличении N на 0,1 мм F уменьшится на 288 Н, что составит всего 0,86 % от среднего значения.

Эти результаты согласуются с полученными ранее результатами теоретических исследований [228, 372]. Снижение F с ростом N можно объяснить

увеличением шага шипов и, соответственно, уменьшением количества шипов при одной и той же ширине заготовки [9]. Уменьшение количества шипов приводит к уменьшению фактического усилия прессования за счет уменьшения рабочей площади контакта, а также к снижению сил трения, возникающих на площадке контакта боковой грани выступа пуансона с формируемой боковой гранью проушины [9].

4.4.3.3 Анализ коэффициента детерминации.

Значение коэффициента детерминации составило $R^2 \approx 0,126$ (рисунок 4.28), т.е. отклик изменяется на 12 % под воздействием всех факторов, входящих в модель. Низкое значение R^2 и высокое значение ошибки оценки регрессии обуславливает поиск другой формы описания процесса прессования, другой кривой аппроксимации. Вместе с тем, полученные результаты имеют ценность при оценке степени влияния каждого из параметров.

4.4.3.4 Исключение факторов, не влияющих на отклик регрессионного анализа.

Для дальнейшего исследования использовали средние значения факторов, приведённые на рисунке 4.32.

Переменная	Средние и ст. отклонения		
	Средние	Ст. Откл.	N
Ширина заготовки, мм	40,20	0,636	102
Толщина заготовки, мм	24,24	0,520	102
Величина зазора / натяга, мм	0,05	0,111	102
Влажность, %	5,49	0,587	102
Высота шипа, мм	8,14	1,181	102
Усилие прессования, Н	33582,97	2367,940	102

Рисунок 4.32 – Средние значения и стандартные отклонения факторов

Обратим внимание, что размеры сечения заготовок 25×40 мм, полученные при раскрое с отклонениями не более ± 1 мм, изменились после выдержки в отапливаемом помещении и составили в среднем по толщине

24,24 ± 0,52 мм и по ширине 40,20 ± 0,63 мм, что также не превышает допустимых отклонений размеров по ГОСТ 9685 [75]. Средняя влажность древесины образцов составила 5,49 ± 0,59 %, что также входит в допустимые пределы.

Таким образом, размеры и влажность заготовок изменялись в относительно малых пределах допустимых отклонений. Это позволило прийти к промежуточному заключению о возможности в данных условиях пренебречь указанными параметрами при оценке влияния высоты шипа на усилие.

4.4.4 Нелинейный регрессионный анализ

Учитывая изложенные выше результаты, пренебрегли малыми изменениями размеров и влажности заготовки и провели регрессионный анализ влияния на усилие прессования двух факторов: величины зазора (натяга) N и высоты шипа h_n . При проведении регрессионного анализа с включением квадратичных эффектов получены результаты, схожие с результатами линейной регрессии: значимым фактором является h_n и его квадратичный эффект (рисунок 4.33).

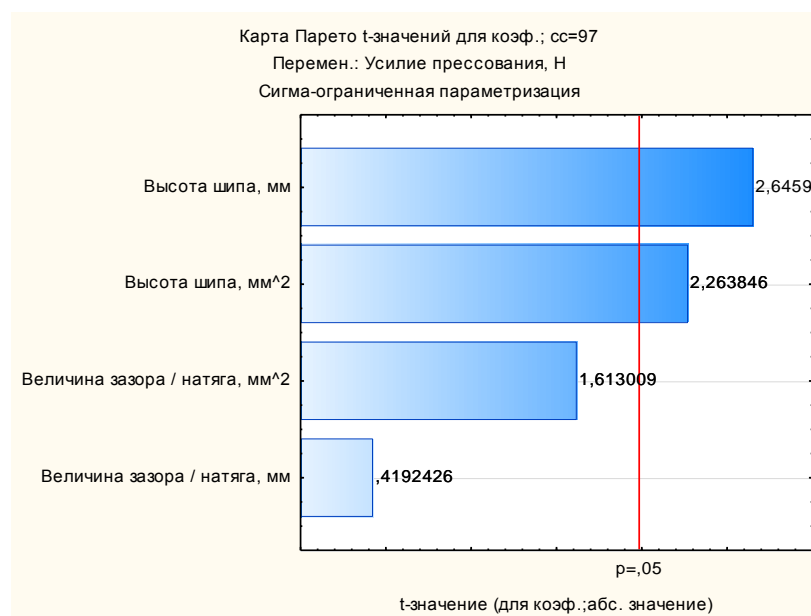


Рисунок 4.33 – Карта Парето

После исключения незначимых параметров полиномиальная модель с квадратичными эффектами приобрела вид:

$$F = 10247,97 + 5274,68h_n - 289,76h_n^2 . \quad (4.33)$$

Так же, как и уравнение (4.32), уравнение (4.33) имеет невысокий коэффициент детерминации $R^2 \approx 0,16$ с уровнем значимости $p = 0,000228 < 0,05$. Тем не менее, прогноз по такой модели будет точнее, чем прогноз по средним значениям. Недостаточно высокое значение R^2 может быть связано с использованием шкалы с крупными единицами измерения – тс, а также с влиянием факторов, не учтенных в числе варьируемых параметров.

Существенным фактором, влияющим на изменение усилия прессования, может являться изменчивость свойств древесины в пределах одной партии, связанная с её строением. В партии исследованных заготовок ширина годичных слоев колеблется в пределах от 0,7 до 4,4 мм (рисунок 4.34).



Рисунок 4.34 – Примеры заготовок из экспериментальной партии с различной шириной годичных слоев

В целом, по оценке данных, проведенной с использованием программного пакета Microsoft Excel, при уменьшении ширины годичного слоя B_l усилие прессования F увеличивается. Это можно продемонстрировать на примере зависимости, полученной для выборки из 30 образцов:

$$F = -17861 \cdot \ln B_l + 34291 , \quad (4.34)$$

с коэффициентом детерминации $R^2 = 0,32$.

Однако в производственных условиях управлять данным параметром с точки зрения организации сортировки сложно и экономически неоправданно. В связи с этим данный параметр нецелесообразно включать в расчётные модели для определения усилия прессования.

Вывод. При формировании элементов шиповых соединений способом торцового прессования обеспечивается технологическая стабильность процесса, что позволяет варьировать рассмотренные параметры режимов в пределах исследованного диапазона без значимого увеличения энергозатрат на изготовления соединения. Полученная регрессионная модель (4.33) может быть применена для прогнозных расчетов величины усилия прессования.

4.5 Выводы

4.5.1 Получены эмпирические модели в виде регрессионных зависимостей, позволяющие определить влияние параметров технологических режимов на усилие прессования прямоугольных проушин. Для процесса статического холодного торцового прессования одинарной проушины в заготовках из рассматриваемых пород наиболее значимым фактором является ширина проушины.

4.5.2 Определены корректирующие коэффициенты для уточнения теоретической модели, описывающей процесс прессования. Отмечена хорошая сходимость уточненных теоретических и эмпирических моделей в исследованном диапазоне: отклонения не превышают 7 %. Уточненная теоретическая модель может быть использована для прогнозирования с достаточной степенью точности величины усилия прессования в исследованном диапазоне параметров режима.

4.5.3 Получены регрессионные модели, описывающие зависимость глубины деформированной зоны и твердости дна проушин от параметров технологических режимов – влажности, глубины и ширины проушины.

Для древесины сосны наиболее значимым фактором по степени влияния на глубину деформированной зоны является ширина проушины, наиболее значимым фактором по степени влияния на твердость дна проушины – влажность.

Для древесины березы наиболее значимым фактором по степени влияния на глубину деформированной зоны является влажность, наиболее значимым фактором по степени влияния на твердость дна проушины – глубина проушины.

Для древесины дуба наиболее значимым фактором по степени влияния на глубину деформированной зоны и твердость дна проушины является ширина проушины.

4.5.4 Решена оптимизационная задача по нахождению рациональных значений параметров технологических режимов, обеспечивающих высокое качество обработки при минимальных энергозатратах. Определены рациональные значения входных параметров (влажности, глубины и ширины проушин) и ожидаемые значения выходных параметров (усилие прессования, твердость дна проушин, глубину деформированной зоны) для каждой из исследованных пород.

Рекомендуемые значения влажности W находятся в пределах 7 – 9,5 %, что указывает на целесообразность проведения обработки при влажности заготовок, близкой к эксплуатационной (для изделий, предназначенных для использования внутри помещений). Результаты оптимизации подтверждают рациональность обработки сухих заготовок при расширении диапазона варьирования влажностью в направлении нижней границы до 6 %.

Значение глубины h_n прессуемых проушин может быть принято максимальным из исследуемого диапазона (до 9 – 11 мм), что позволяет изготавливать шипы увеличенной длины.

Оптимальное значение управляющего фактора «ширина проушины» $B = 4$ мм расположено на нижней границе диапазона варьирования, что указывает на перспективы изготовления шипов малых толщин. Целевая функция имеет потенциал в направлении уменьшения ширины проушин, что может быть использовано для совершенствования прочностных показателей клеевых соединений на многократные прессованные шипы.

4.5.4 При формировании многократных проушин способом торцового прессования в заготовках с размерами сечения и влажностью, изменяющимися в пределах допустимых отклонений, обеспечивается технологическая стабильность процесса. Изменение конструктивных параметров, влияющих на повышение прочностных характеристик шипового соединения (величины зазора (натяга) N и высоты шипа) незначительно сказывается на возрастании усилия (не более 12 %).

Это позволяет варьировать указанные параметры в пределах исследованного диапазона с целью получения заданных прочностных характеристик шипового соединения, без значимого увеличения энергозатрат на изготовление соединения.

5 ИССЛЕДОВАНИЕ ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ШИПОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ СПОСОБОМ ТОРЦОВОГО ПРЕССОВАНИЯ

Промышленное внедрение технологии сращивания на многократные прямоугольные прессованные шипы требует подтверждения высокого уровня качества получаемых соединений. В разделе 1 установлено, что в перечень основных показателей качества входят прочность соединений при растяжении и изгибе, точность формирования и шероховатость поверхностей шипов, качество макроструктуры пластически деформированной зоны. Эти показатели требуют экспериментальной оценки. Среди приведенных показателей приоритетным является прочность соединений. Как показано в п. 1.3, прочность зависит от геометрических характеристик шипов, расхода клея. Для разработки рекомендаций по проектированию соединений необходимо установить взаимосвязь между указанными параметрами.

Цель раздела – оценка показателей качества соединений на прессованные шипы и исследование влияния геометрических характеристик шипов на прочность соединений.

В разделе представлены результаты:

- экспериментальной оценки прочности соединений по длине на прямоугольные прессованные шипы при растяжении и изгибе;
- экспериментальной оценки точности формирования и шероховатости поверхностей шипов;
- оценки качества макроструктуры пластически деформированной зоны в древесине исследуемых пород;
- экспериментального исследования влияния геометрических характеристик шипов на прочность соединений.

Представленные в разделе результаты исследований прошли апробацию и опубликованы автором в работах [117, 119, 123, 173, 202, 206-209, 217-219, 222, 225, 227-229, 230, 371].

5.1 Экспериментальная оценка прочности клеевых соединений по длине на прямоугольные прессованные шипы

Задачи подраздела:

- определить относительную прочность соединений при растяжении C_r и при статическом изгибе C_{iz} ;
- установить взаимосвязь между типом соединения и его прочностью;
- сравнить влияние вида испытаний на показатели прочности.

5.1.1 Постановка экспериментов по оценке прочности соединений

На рассматриваемом этапе работы исследованы образцы двух типоразмеров с толщиной шипа 2 и 4 мм, длиной 10 и 20 мм соответственно (см. п. 3.4.5, таблица 3.3). Для удобства далее они обозначены как типоразмеры А и Б.

Таблица 5.1 – Геометрические параметры шипов

Типоразмер соединения	Типоразмер пуансона	$S_{ш}$, мм	B , мм	$t_{ш}$, мм	h_n , мм
А	10/2,2/10/2	2	2,2	4,2	10
Б	5/4,2/20/4	4	4,2	8,2	20

Методика экспериментальных исследований описана в п. 3.4.5. Пример методической сетки для проведения эксперимента показан в таблице 5.1 для склеенных заготовок из древесины сосны. Соединения заготовок из древесины березы и дуба испытаны по аналогичной методике, отличия состояли в величине средней влажности (7 % для обеих пород) и количестве оцененных образцов (соответственно по 5 штук для каждой породы и для каждого вида испытания). Всего испытано 32 образца из древесины сосны, 20 из древесины дуба, 20 из древесины березы.

Таблица 5.1 – Методическая сетка проведения эксперимента по определению прочности соединений для заготовок из древесины сосны

Исследуемая характеристика	Постоянные факторы		Переменные факторы		Выходной параметр	Количество опытов	Количество повторений опытов	Количество наблюдений в опыте	Общее количество наблюдений
	наименование, единицы измерения	значение	наименование	значение					
Прочность соединений при растяжении	Размеры заготовки ($S \times B_3 \times L$), мм	8×35×300	Типоразмер	А	Относительная прочность при растяжении	8	1	1	8
	Влажность древесины средняя, %	9							
	Марка клея	ПВА «Супер» (ПАО «Акрон»)							
	Способ нанесения клея	двухсторонний							
	Расход клея, г/м ²	не более 200							
	Время открытой выдержки, с	30		Б					
	Время закрытой выдержки, с	30							
	Усилие запрессовки, кН	1							
	Время выдержки под давлением, с	30							
	Скорость приложения нагрузки, мм/мин	10							
	Время до разрушения, с	20,0 ± 10,0							

Исследуемая характеристика	Постоянные факторы		Переменные факторы		Выходной параметр	Количество опытов	Количество повторений опытов	Количество наблюдений в опыте	Общее количество наблюдений
	наименование, единицы измерения	значение	наименование	значение					
Прочность соединений при статическом изгибе	Размеры заготовки ($S \times B_3 \times L$), мм	20×35×300	Типоразмер	А	Относительная прочность при растяжении	8	1	1	8
	Влажность древесины средняя, %	9							
	Марка клея	ПВА «Супер» (ПАО «Акрон»)							
	Способ нанесения клея	двухсторонний							
	Расход клея, г/м ²	не более 200							
	Время открытой выдержки, с	30		Б					
	Время закрытой выдержки, с	30							
	Усилие запрессовки, кН	1							
	Время выдержки под давлением, с	30							
	Скорость приложения нагрузки, мм/мин	10							
Время до разрушения, с	2,5 ± 0,5								

Результаты испытаний образцов на прочность при растяжении и статическом изгибе, а также относительная прочность соединений приведены в таблицах 5.2 – 5.7.

Таблица 5.2 – Результаты испытаний соединений на растяжение, сосна

Номер опыта	Тип соединения	Характер разрушения	Предел прочности, МПа	Относительная прочность соединения, %
1	А	по древесине	46,72	59,55
2	А	по древесине	45,91	58,52
3	А	смешанный	41,06	52,34
4	А	по древесине	46,72	59,55
5	А	смешанный	44,30	56,47
6	А	по древесине	49,15	62,65
7	А	по древесине	46,24	58,94
8	А	по древесине	53,03	67,60
9	Б	по древесине	42,68	54,40
10	Б	смешанный	40,42	51,52
11	Б	по древесине	42,84	54,61
12	Б	смешанный	41,23	52,56
13	Б	по древесине	41,87	53,37
14	Б	по древесине	43,12	54,96
15	Б	по древесине	39,85	50,80
16	Б	смешанный	42,14	53,72

Таблица 5.3 – Результаты испытаний соединений на изгиб, сосна

Номер опыта	Тип соединения	Характер разрушения	Предел прочности, МПа	Относительная прочность соединения, %
17	А	по древесине	54,90	89,74
18	А	по древесине	41,92	68,52
19	А	по древесине	48,91	79,94

Номер опыта	Тип соединения	Характер разрушения	Предел прочности, МПа	Относительная прочность соединения, %
20	А	по древесине	52,90	86,47
21	А	по древесине	45,91	75,04
22	А	смешанный	50,20	82,05
23	А	смешанный	48,92	79,96
24	А	по древесине	51,23	83,74
25	Б	по древесине	47,91	78,31
26	Б	по древесине	49,91	81,58
27	Б	по древесине	45,91	75,04
28	Б	смешанный	57,89	94,62
29	Б	смешанный	40,92	66,88
30	Б	по древесине	43,18	70,58
31	Б	смешанный	55,67	90,99
32	Б	по древесине	48,95	80,01

Таблица 5.4 – Результаты испытаний соединений на растяжение, береза

Номер опыта	Тип соединения	Характер разрушения	Предел прочности, МПа	Относительная прочность соединения, %
33	А	по древесине	59,53	51,77
34	А	по древесине	56,68	49,30
35	А	смешанный	53,36	46,41
36	А	по древесине	49,56	43,10
37	А	по древесине	57,48	49,99
38	Б	по древесине	50,35	43,79
39	Б	смешанный	52,09	45,30
40	Б	по древесине	53,68	46,69
41	Б	по древесине	50,51	43,93
42	Б	по древесине	51,30	44,62

Таблица 5.5 – Результаты испытаний соединений на изгиб, береза

Номер опыта	Тип соединения	Характер разрушения	Предел прочности, МПа	Относительная прочность соединения, %
43	А	по древесине	48,09	52,09
44	А	по древесине	49,00	53,08
45	А	по древесине	53,53	57,98
46	А	по древесине	54,44	58,97
47	А	по древесине	51,72	56,02
48	Б	смешанный	47,18	51,10
49	Б	по древесине	54,44	58,97
50	Б	смешанный	49,91	54,06
51	Б	по древесине	52,63	57,01
52	Б	по древесине	47,18	51,10

Таблица 5.6 – Результаты испытаний соединений на растяжение, дуб

Номер опыта	Тип соединения	Характер разрушения	Предел прочности, МПа	Относительная прочность соединения, %
53	А	по древесине	59,90	60,66
54	А	по древесине	55,87	56,58
55	А	смешанный	53,48	54,16
56	А	по древесине	48,91	49,53
57	А	по древесине	56,17	56,88
58	Б	по древесине	50,41	51,05
59	Б	смешанный	53,01	53,68
60	Б	по древесине	52,19	52,85
61	Б	по древесине	49,84	50,47
62	Б	по древесине	51,02	51,67

Таблица 5.7 – Результаты испытаний соединений на изгиб, дуб

Номер опыта	Тип соединения	Характер разрушения	Предел прочности, МПа	Относительная прочность соединения, %
63	А	по древесине	40,13	46,27
64	А	по древесине	46,03	53,07
65	А	по древесине	49,61	57,20
66	А	по древесине	51,42	59,29
67	А	по древесине	47,13	54,34
68	Б	смешанный	43,12	49,72
69	Б	по древесине	51,18	59,01
70	Б	смешанный	46,16	53,22
71	Б	по древесине	48,54	55,97
72	Б	по древесине	45,45	52,40

Разрушение склеенных образцов при испытаниях на прочность происходило в части случаев по древесине, в части случаев характер разрушения был смешанный (адгезионно-когезионный) – по древесине и клеевому шву (рисунки 5.1, 5.2). Данные результаты можно считать удовлетворительными: известно, что зубчатые соединения могут разрушаться как по древесине, так и по клеевому шву – до 20 – 30 % от общего числа испытанных образцов [284, 387].

Сравнение абсолютных значений прочности исследованных образцов, приведенных в таблицах 5.2 – 5.7, с требованиями к прочности пиломатериалов и клееных деревянных конструкций, приведенных в стандартах [54, 55, 61, 62, 77] показывает, что соединения соответствуют классам прочности пиломатериалов до класса С30 включительно и могут быть отнесены к достаточно высокому классу прочности элементов конструкций К36 (на примере для заготовок из древесины сосны). Это позволит использовать соединения на прессованные шипы в заготовках для столярно-строительных и других изделий [39, 57, 59, 67].

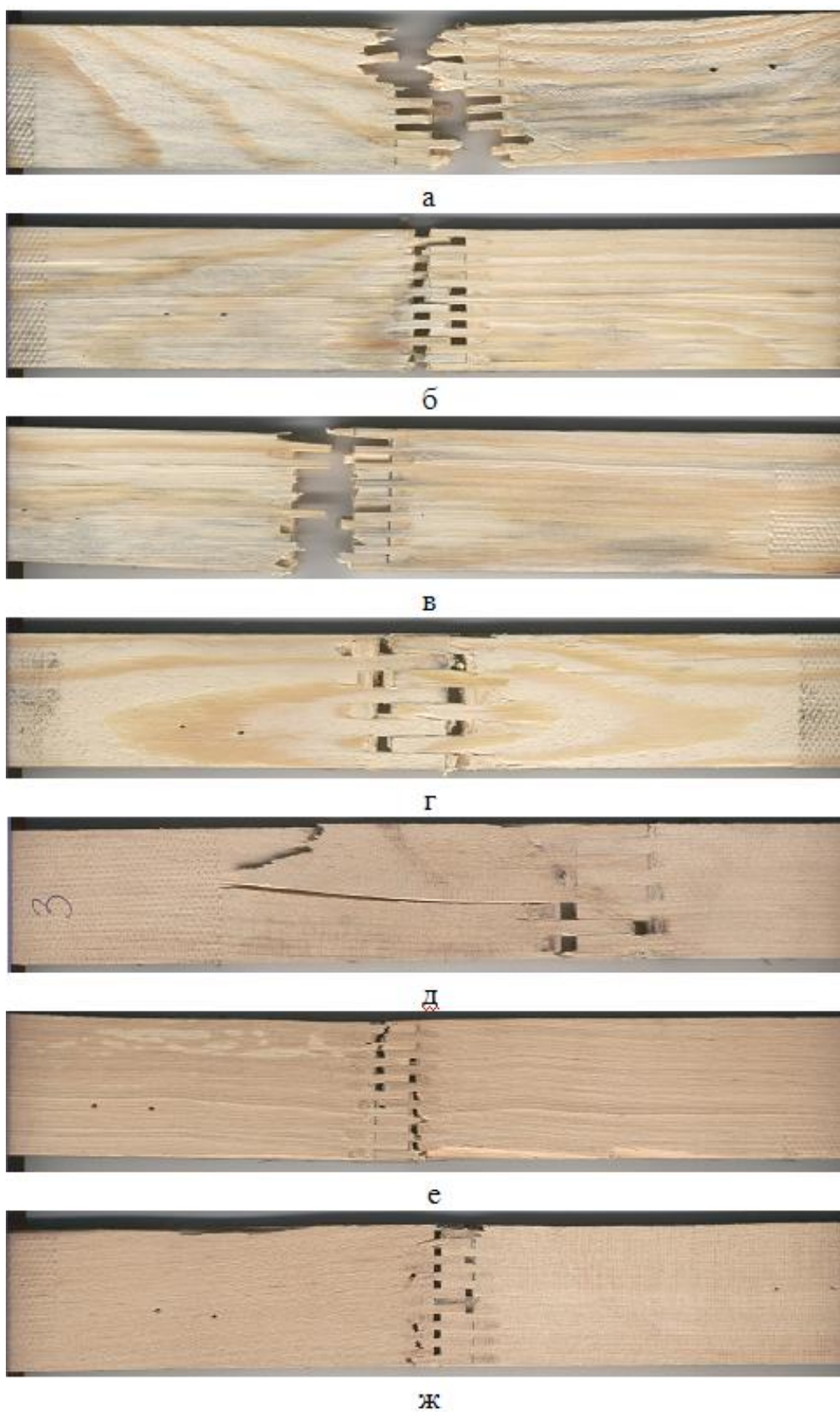


Рисунок 5.1 – Примеры разрушения образцов при испытаниях на растяжение:
а-г – образцы из древесины сосны; *д-ж* – образцы из древесины березы;
а-в, е, ж – типоразмер А; *г, д* – типоразмер Б



Рисунок 5.2 – Примеры разрушения образцов при испытаниях на изгиб:
а-б – образцы из древесины березы; *в-г* – образцы из древесины сосны;
а, б, г – типоразмер А; *в* – типоразмер Б

Так, по ГОСТ 475 прочность на изгиб соединений по длине для деталей коробок дверей должна составлять не менее 20 МПа, для других деталей – не менее 26 МПа, что существенно ниже прочности испытанных соединений. Следовательно, по полученным значениям прочности, приведенным в таблицах 5.2 – 5.7, можно считать прочность исследуемых соединений достаточной, удовлетворяющей требованиям стандартов на изделия из клеенных по длине заготовок.

Относительная прочность соединений составила:

а) при растяжении:

- для образцов из древесины сосны от 50,80 до 67,60 %;
- для образцов из древесины березы от 43,10 до 51,77 %;
- для образцов из древесины дуба от 49,53 до 60,66 %;

б) при изгибе:

- для образцов из древесины сосны от 66,88 до 94,62 %;
- для образцов из древесины березы от 51,10 до 58,97 %;
- для образцов из древесины дуба от 46,27 до 59,29 %.

Полученные характеристики прочности удовлетворяют требованиям указанных выше стандартов.

5.1.2 Статистическая обработка и анализ результатов экспериментальных исследований прочности соединений

В связи с изменчивостью свойств древесины образцов, наличием значительного количества влияющих факторов механической, прессовой обработки, режимов склеивания для подготовки заключения о прочности соединений недостаточно простого усреднения полученных данных, а требуется их статистическая обработка. План статистического анализа приведен в п. 3.5.2.5. Ниже приведен пример статистической обработки результатов испытаний на прочность для клеенных заготовок из древесины сосны.

На первом этапе статистической обработки провели проверку нормальности распределения объединенных данных для опытов 1 – 32 (таблицы 5.2, 5.3) с целью выявления возможности получения обобщенной характеристики прочности соединений, учитывающей данные для всех видов испытаний и типов соединений. Подобные обобщенные характеристики (без указания вида испытаний) встречаются в учебной и научной литературе по зубчатым соединениям: «относительная прочность соединения» 65 – 75 % [32], «нормативная прочность» 50–70 % [284]; прочность свыше 75 % [387].

Статистический анализ объединенных данных показал, что исследуемое распределение нельзя отнести к нормальным, в частности, по критерию Шапиро-Уилка (рисунок 5.3). Уровень значимости критерия составил $p \approx 0,013$, что меньше заданного уровня $p = 0,05$, следовательно, гипотеза о нормальности распределения отклоняется. Таким образом, охарактеризовать прочность с помощью обобщенного показателя, учитывающего данные для разных типов испытаний и соединений, не представляется возможным.

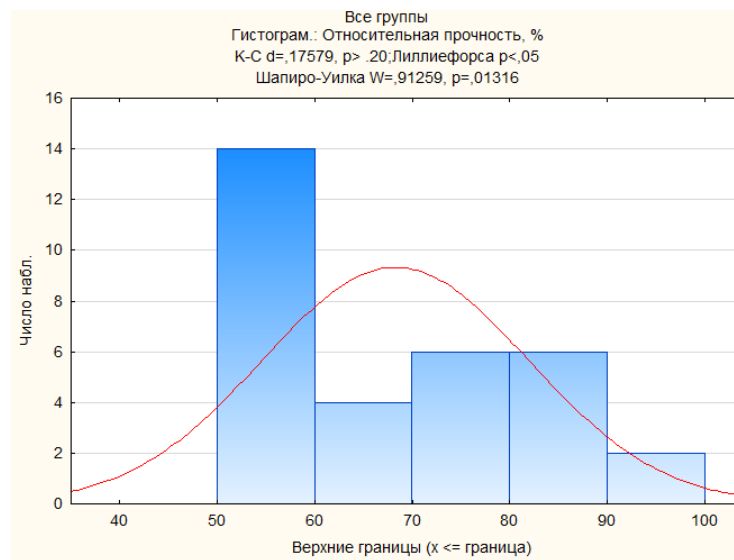


Рисунок 5.3 – Частотная гистограмма для всех видов испытаний и всех типов соединений (сосна)

На втором этапе статистической обработки данные разделили на группы в соответствии с видом испытания и типом соединения.

На третьем этапе статистической обработки провели проверку нормальности распределения для данных, группированных по видам испытаний.

При выборе переменной «вид испытания» в качестве группирующей распределение данных близко к нормальному. Этот вывод можно сделать по следующим критериям:

а) по результатам графического анализа нормальности данных с помощью нормально-вероятностных графиков и частотных гистограмм (рисунок 5.4). Точки фактических данных расположены вблизи теоретической прямой, систематических отклонений не наблюдается, несистематические выбросы отсутствуют;

б) с помощью теста Шапиро-Уилка. Для группы данных «Вид испытания – на растяжение» уровень значимости составил $p = 0,12936$, для группы «Вид испытания – на изгиб» уровень значимости составил $p = 0,90210$. В обоих случаях это больше заданного уровня: $p > 0,05$, что позволяет не отклонять гипотезу о нормальности распределения.

На четвертом этапе статистической обработки провели проверку однородности дисперсий выборок, *на пятом этапе* – выявление различий между средними в группах.

Проверка однородности дисперсий двух выборок по критерию Левина показала, что поскольку уровень значимости критерия $p \approx 0,10$ больше заданного уровня значимости $p = 0,05$, однородность дисперсий присутствует. Тогда полученные данные для t -критерия Стьюдента будут достоверными; рассчитанный p -уровень для критерия Стьюдента $p = 0$, это меньше, чем заданный уровень значимости $p = 0,05$. Следовательно различие между средними в группах есть, и оно статистически значимо, т.е. средние значения относительной прочности при растяжении и изгибе отличаются, что дополнительно подтверждает результаты первого этапа статистической обработки: в исследованном диапазоне экспериментальных данных обобщенная характеристика прочности статистически не оправдана.

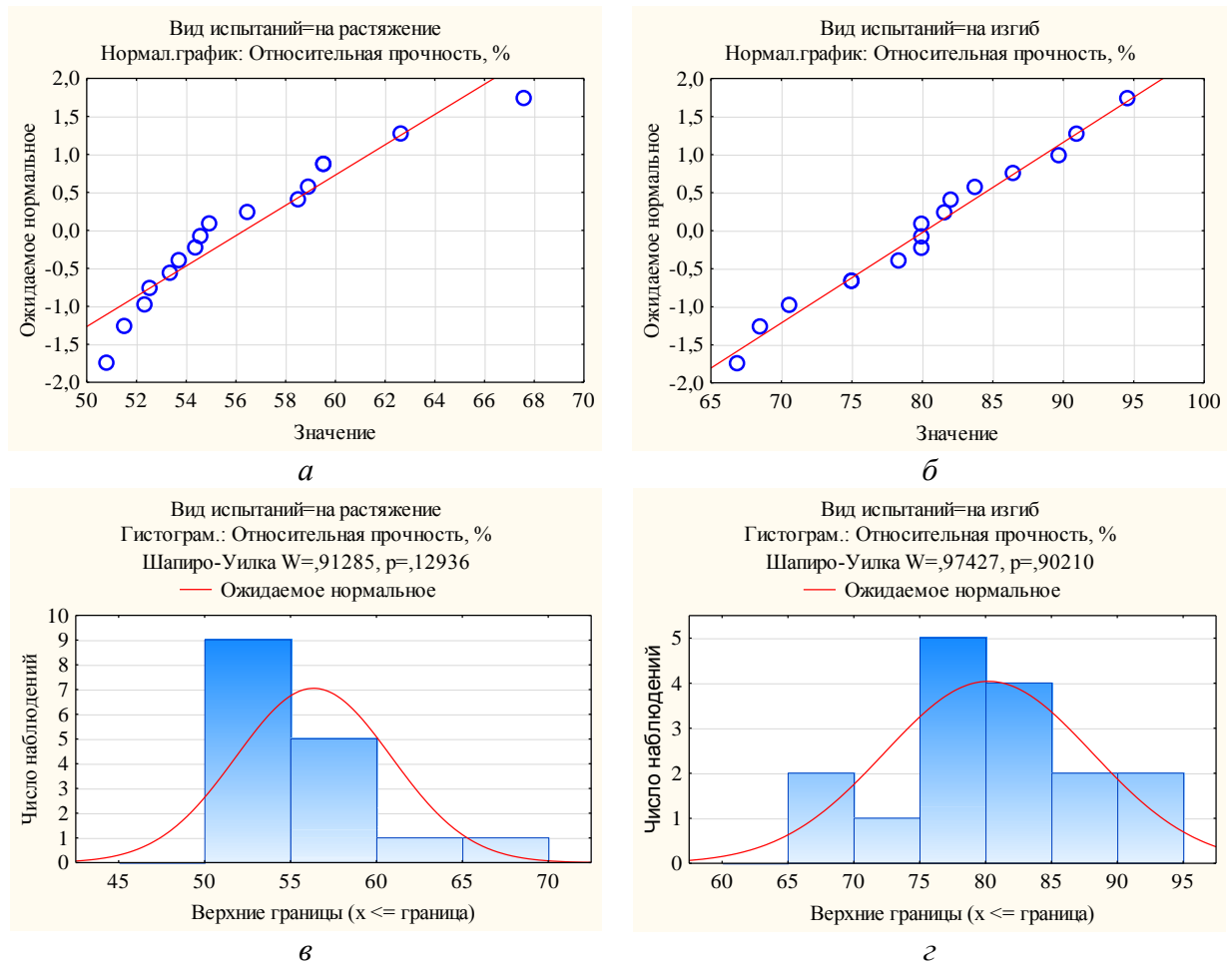


Рисунок 5.4 – Нормально-вероятностные графики и частотные гистограммы соответственно для испытаний на растяжение (*a*, *б*) и на изгиб (*в*, *г*)

Полученные результаты демонстрируют рациональность подхода к характеристике относительной прочности соединений без усреднения данных по разным видам испытаний. Подобный подход используют R. W. Jokerst, Z. Ahmad, I. Barboutis и другие ученые [312, 340, 349, 359].

На шестом этапе статистической обработки определили характеристики средних значений для сгруппированных данных.

На рисунке 5.5 приведены диаграммы размаха, позволяющие оценить характеристики средней относительной прочности для данных, сгруппированных по видам испытаний.

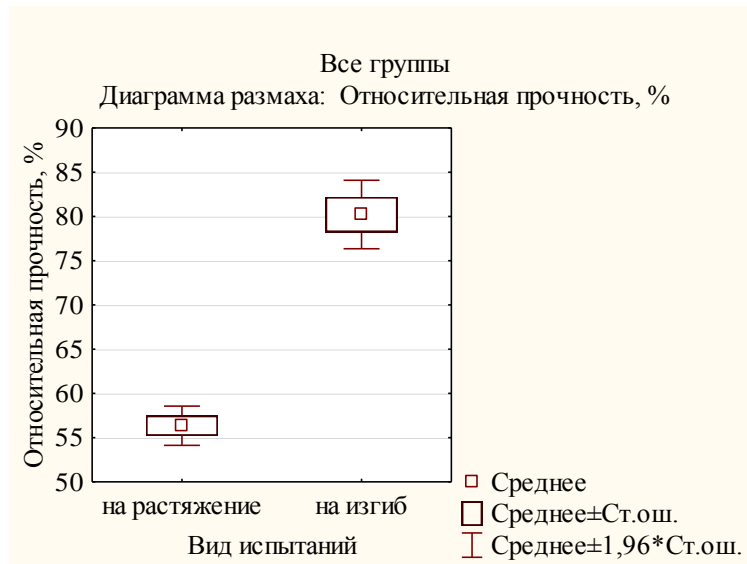


Рисунок 5.5 – Диаграммы размаха для данных, сгруппированных по видам испытаний

Стоит отметить, что данные достаточно тесно сгруппированы, что указывает на сравнительно малое влияние типа соединения на его прочность. Испытанные соединения показывают удовлетворительный уровень относительной прочности: на растяжение 56,4 % и на изгиб 80,2 %. Для сравнения, другие исследователи отмечают следующие значения прочности зубчатых шиповых соединений: при изгибе по пласти от 33–50 % [32, 341] до 49–69 % при изгибе по кромке [341, 387]; при растяжении до 57–80 % [352, 387].

Далее описанную выше процедуру обработки провели для данных, сгруппированных по типу соединения. Сначала провели проверку нормальности распределения данных. Распределение данных для соединения типа *A* показало близость к нормальному (рисунок 5.6). Уровень значимости критерия Шапиро-Уилка составил $p = 0,14606 > 0,05$, поэтому гипотеза о нормальности не отклоняется.

Аналогичное статистическое исследование для соединения типа *B* выявило отсутствие нормальности распределения по критерию Шапиро-Уилка: $p = 0,01841 < 0,05$.

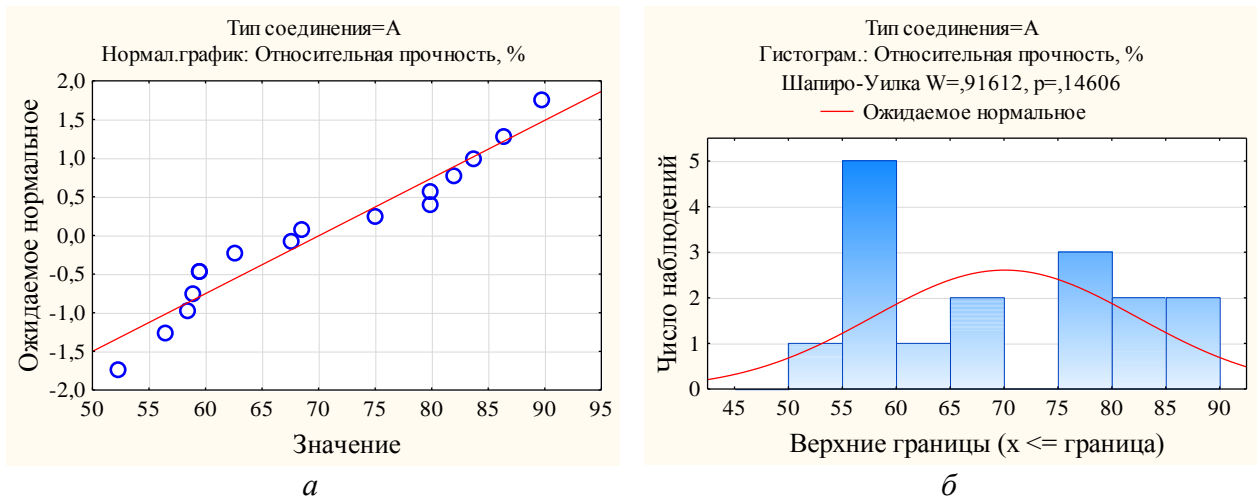


Рисунок 5.6 – Нормально-вероятностный график (а) и частотная гистограмма (б) для соединения типа А

Сравнение средних для двух рассматриваемых групп по критерию Манна-Уитни, применяемому при ненормальном распределенных данных, показало, что $p = 0,258196 > 0,05$, следовательно, различие между средними в группах статистически незначимо. Таким образом, сделать статистически достоверный вывод о влиянии типа соединения на относительную прочность не представляется возможным.

Далее описанную выше процедуру обработки данных провели для данных, разделенных на четыре группы, отличающиеся по параметрам «Тип соединения» и «Вид испытания», что позволило проанализировать влияние этих факторов на зависимую переменную (отклик) «Относительная прочность» по отдельности.

Категоризированные вероятностные графики и частотные гистограммы (рисунки 5.7, 5.8) позволяют характеризовать каждое распределение в целом как нормальное, что подтверждает оценка с помощью критерия Шапиро-Уилка. Уровни его значимости составили: при испытаниях на растяжение для соединений типа А – $p = 0,6852$, типа В – $p = 0,5286$; при испытаниях на изгиб – $p = 0,8656$ и $p = 0,8021$ соответственно, что больше заданного уровня значимости $p = 0,05$ и позволяет не отклонять гипотезу о нормальности для каждого рассмотренного распределения.

По методике, используемой выше, выявлено статистически значимое различие между средними значениями прочности для соединений типа *A* и *B* при испытаниях на растяжение и отсутствие различия между средними для соединений *A* и *B* при испытаниях на изгиб (рисунок 5.9).

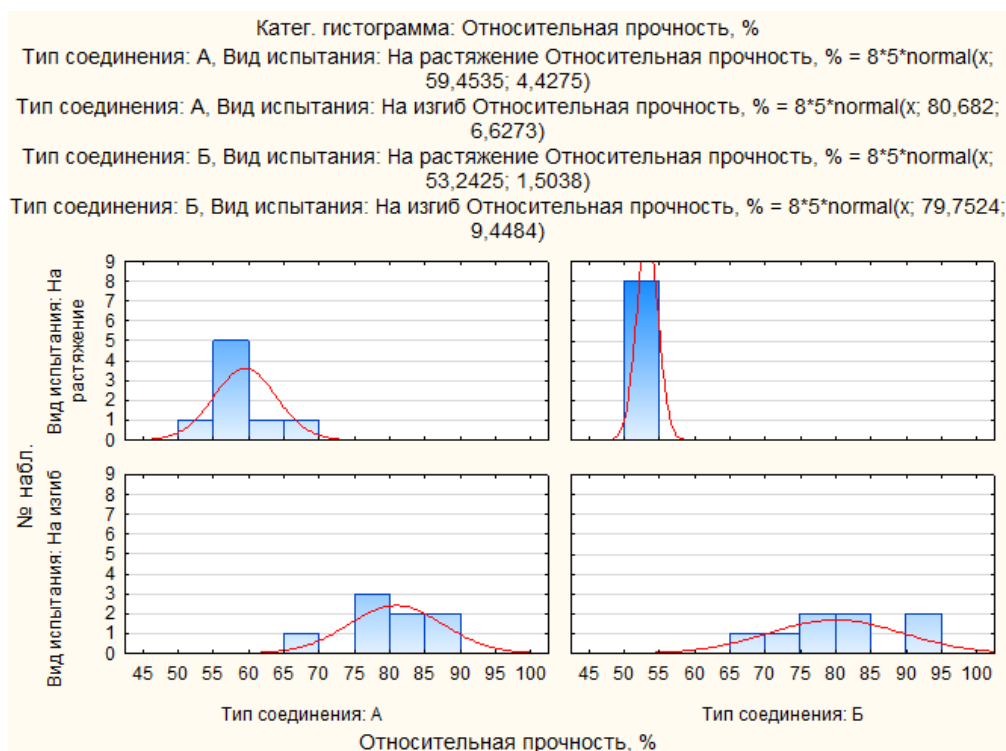


Рисунок 5.7 – Частотные гистограммы для категоризированных групп

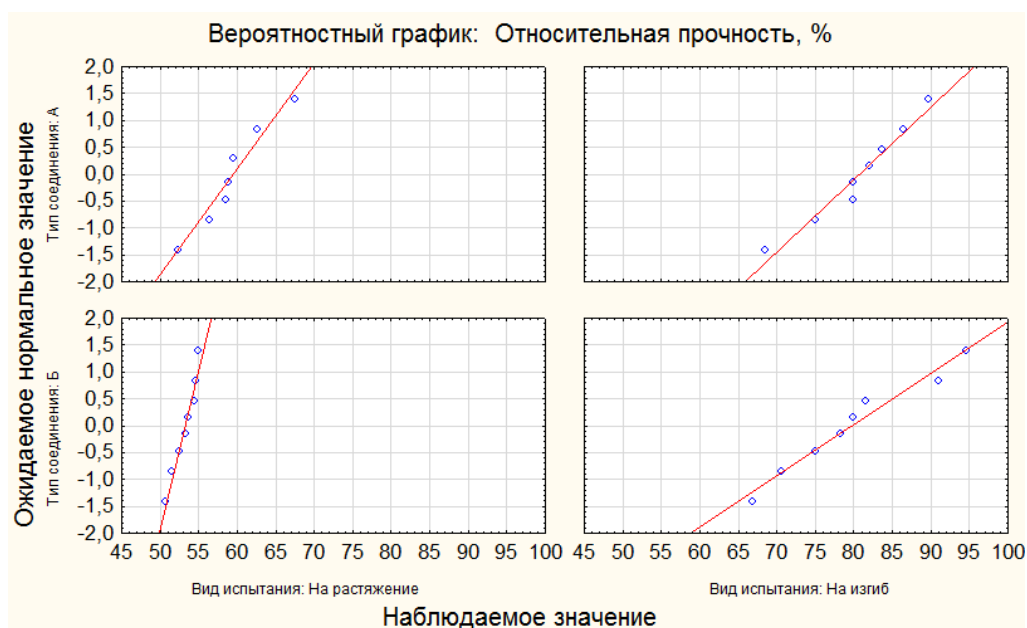


Рисунок 5.8 – Нормально-вероятностные графики для категоризированных групп



Рисунок 5.9 – Категоризированная диаграмма размаха для 4-х групп, отличающихся по типу соединения и виду испытаний

Для соединения типа *A* относительная прочность на растяжение равна 59,5 % (с доверительной вероятностью 95% лежит в интервале 55,8 – 63,2 %), на изгиб – 80,7 % (75,1 – 86,2 %). Для соединения типа *B* – соответственно 53,2 % (52,0 – 54,5 %) и 79,8 % (71,9 – 87,7 %). Результаты испытаний колеблются в сравнительно узком диапазоне, что говорит о стабильном качестве клеевых соединений.

Более высокая прочность на растяжение отмечена у соединения типа *A* с меньшими размерами шипов. В число возможных причин этого явления могут входить меньшие размеры деформированной зоны древесины под дном проушины. Этот уплотненный участок («пробка» из деформированной древесины [338, 371]) сходен по своему влиянию на прочность с сучками в пиломатериалах из массива древесины.

Известно, что наличие сучков в пиломатериалах снижает их прочность до 60 – 75%, а с увеличением размеров сучков возрастает их влияние на прочность [32]. Увеличение размеров деформированных зон под дном проушин может снижать прочность соединений подобным образом, поэтому меньшие размеры шипов могут быть более предпочтительны с точки зрения

повышения прочности соединений. Проверка данной гипотезы является предметом дальнейших исследований.

Другим требующим проверки фактором, влияющим на прочность, может являться площадь клеевого шва [96, 181, 387, 390], которая для соединения типа *A* будет больше. Кроме того, мелкие шипы выглядят более эстетично. Таким образом, в задачи дальнейших исследований входит изучение закономерностей поведения под нагрузкой соединений с мелкими (толщиной порядка 2 мм, длиной 10 мм) шипами.

По методике, используемой выше, определены характеристики прочности также для образцов из древесины березы и дуба. Для соединений типа *A* относительная прочность при растяжении составила 54,67 % (береза), 54,98 % (дуб), при изгибе 51,65 % (береза), 47,68 % (дуб). Для соединений типа *B* относительная прочность при растяжении составила 51,69 % (береза), 51,94 % (дуб), при изгибе 50,86 % (береза), 46,98 % (дуб). В целом, эти показатели ниже, чем для соединений заготовок из древесины сосны, но также демонстрируют общую тенденцию более высокой прочности соединений на шипы малых размеров.

Средняя прочность при растяжении может быть с достаточной достоверностью охарактеризована средним для двух типов соединений значением 53,16 % (береза), 53,46 % (дуб), при изгибе – 51,26 % (береза), 47,33 % (дуб).

Полученные для трех пород результаты сведены в таблицу 5.8. Приведенные значения могут быть использованы для прогнозирования прочности клеевых шиповых соединений для исследованных пород.

Таблица 5.8 – Средние значения относительной прочности, %

Порода	Типоразмер соединения	Вид испытания			
		на растяжение		на изгиб	
		по типам соединений	средняя для двух типов	по типам соединений	средняя для двух типов
Сосна	<i>A</i>	59,5	56,4	80,7	80,2
	<i>B</i>	53,2		79,8	

Порода	Типоразмер соединения	Вид испытания			
		на растяжение		на изгиб	
		по типам соединений	средняя для двух типов	по типам соединений	средняя для двух типов
Береза	<i>A</i>	54,67	53,16	51,65	51,26
	<i>B</i>	51,69		50,86	
Дуб	<i>A</i>	54,98	53,46	47,68	47,33
	<i>B</i>	51,94		46,98	

5.2 Результаты исследований точности формирования шипов и качества обработки поверхности проушин

Исследования, проведенные по методике, приведенной в п. 3.4.6, позволили установить, что формирование шипов с использованием базирующих и обжимных устройств позволяет достичь точности изготовления не ниже 13 квалитета, требуемого в ГОСТ 9330-2016 [73]. Так, максимальные отклонения ширин проушин с номинальным значением 2,2 мм, измеренные с использованием микроскопа, составили не более + 0,134 мм; максимальные отклонения глубин проушин с номинальным значением 20 мм составили + 0,098 мм [371].

Дно проушины имеет низкую шероховатость с максимальной высотой неровностей не более 86 мкм. При этом поры «запечатаны» за счет наклона и сплющивания поверхностных волокон [371]. Это снижает вероятность ослабления клеевого соединения по причине высокой впитываемости клея при его нанесении на торцовые поверхности.

5.3 Экспериментальная оценка качества макроструктуры пластически деформированной зоны

Оценка проведена по методике, изложенной в п. 3.4.7. Исследовано по 15 образцов каждой породы.

Качество макроструктуры деформированной зоны в образцах из древесины сосны в значительной мере зависело от исходного качества древесины образцов: наличие косослоя резко снижало качество макроструктуры под проушиной. В 77 % образцов из древесины сосны макроструктура деформированных зон получила оценки в 4 и 5 баллов (практически незаметные невооруженным глазом изменения макроструктуры), в 15 % – 3 балла (малозаметные изменения), в 6 % – 2 балла. Более высокие оценки получены для древесины с наклоном волокон не более 15 %. Средний балл для всех заготовок – 3,9.

Образцы из древесины березы и дуба в целом получили менее высокие оценки, что связано с большей плотностью древесины и видимым потемнением уплотненных участков. Наиболее высокие оценки получены для древесины березы и дуба с наклоном волокон не более 10 %. 39 % образцов из древесины березы и 29 % образцов из древесины дуба были оценены на 4 балла. Отмечено, что по сравнению с заготовками из древесины сосны, в заготовках из более плотной древесины лиственных пород чаще возникали дефекты структуры: 8 % образцов из древесины березы и 13 % образцов из древесины дуба были оценены на 1 балл. Средний балл для всех заготовок из древесины березы – 3,1, из древесины дуба – 2,8.

Сравнительные результаты оценки качества макроструктуры деформированной зоны под проушиной на образцах из древесины сосны, березы и дуба представлены на рисунке 5.10.

Таким образом, проведенная оценка качества макроструктуры пластически деформированной зоны показала достаточно высокие результаты для образцов из древесины сосны, средние результаты для образцов из древесины березы и результаты ниже среднего для образцов из древесины дуба.

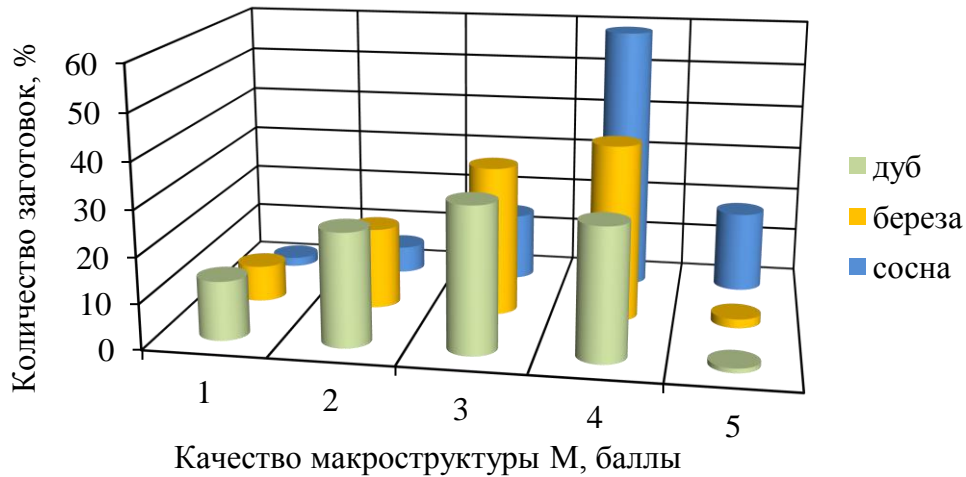


Рисунок 5.10 – Результаты оценки качества макроструктуры пластически деформированной зоны

5.4 Исследование влияния геометрических характеристик шипов и расхода клея на прочность соединений

Подводя промежуточный итог этапов исследований 3.1 – 3.4 (рисунок 3.1), можно отметить, что по совокупности показателей соединения на пресованный прямоугольный шип не уступают по качеству традиционно применяемым зубчатым шиповым соединениям, а значит, могут быть рекомендованы к внедрению в промышленное производство.

Выше показано (п. 1.3, 2.4), что расход клея и геометрические характеристики шипов оказывают значительное влияние на показатели прочности клеевых соединений. В п. 5.1 установлено, что шипы малых размеров обеспечивают более высокую прочность клеевым соединениям. Для разработки рекомендаций по проектированию соединений необходимо установить взаимосвязь между указанными параметрами.

Задача подраздела – установить влияние геометрических характеристик шипов (величины зазора S (натяга N) по толщине шипов и глубины проушин (длины шипов) h_n) и расхода клея R_k на прочность соединений при растяжении $\sigma_{r.c}$ и изгибе $\sigma_{iz.c}$.

5.4.1 Постановка экспериментов по исследованию влияния геометрических характеристик шипов и расхода клея на прочность соединений

На данном этапе работы исследованы образцы клеевых соединений заготовок из древесины сосны с шириной проушин 2,2 мм, толщиной шипов от 2,0 до 2,4 мм, длиной шипов от 5,3 до 10,3 мм соответственно (см. п. 3.4.5, таблица 3.3).

Методика подготовки образцов описана в п. 3.4.1, методика экспериментальных исследований – в п. 3.4.5. Схема описания процесса приведена на рисунке 5.11. Методические сетки проведения эксперимента показаны в таблицах 5.9, 5.10.

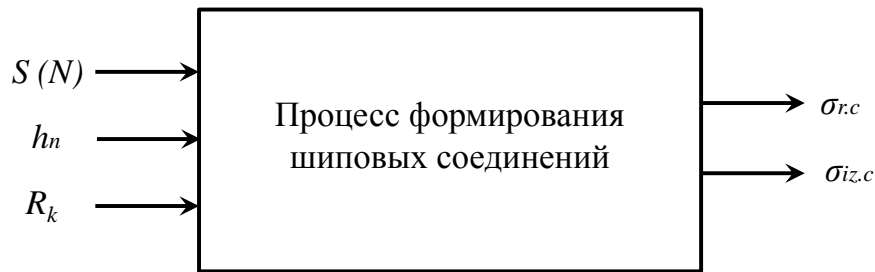


Рисунок 5.11 – Схема описания процесса формирования шиповых соединений

Результаты испытаний образцов на прочность при растяжении и статическом изгибе приведены в таблицах 5.11, 5.12.

Таблица 5.9 – Методическая сетка проведения эксперимента по определению влияния геометрических характеристик шипов и расхода клея на прочность соединений при растяжении

Исследуемая характеристика	Постоянные факторы		Переменные факторы		Выходной параметр	Количество опытов	Количество повторений опытов	Количество наблюдений в опыте	Общее количество наблюдений
	наименование, единицы измерения	значение	наименование, единицы измерения	значение					
Прочность соединений при растяжении	Размеры заготовки ($S \times B_3 \times L$), мм	8×35×300	Зазор (натяг), мм	-0,1; 0; 0,1 0,2	Относительная прочность при растяжении	10	2	1	20
	Влажность древесины средняя, %	9							
	Марка клея	ПВА «Супер» (ПАО «Акрон»)							
	Способ нанесения клея	двухсторонний							
	Время открытой выдержки, с	30	Длина шипа h_n , мм	5,3–10,3					
	Время закрытой выдержки, с	30							
	Усилие запрессовки, кН	1							
	Время выдержки под давлением, с	30	Расход клея, г/м ²	97,2–340,1					
	Скорость приложения нагрузки, мм/мин	10							
Время до разрушения, с	20,0 ± 10,0								

Таблица 5.10 – Методическая сетка проведения эксперимента по определению влияния геометрических характеристик шипов и расхода клея на прочность соединений при статическом изгибе

Исследуемая характеристика	Постоянные факторы		Переменные факторы		Выходной параметр	Количество опытов	Количество повторений опытов	Количество наблюдений в опыте	Общее количество наблюдений
	наименование, единицы измерения	значение	наименование, единицы измерения	значение					
Прочность соединений при растяжении	Размеры заготовки ($S \times B_3 \times L$), мм	20×35×300	Зазор (натяг), мм	-0,1; 0; 0,1 0,2	Относительная прочность при изгибе	10	2	1	20
	Влажность древесины средняя, %	9							
	Марка клея	ПВА «Супер» (ПАО «Акрон»)							
	Способ нанесения клея	двухсторонний							
	Время открытой выдержки, с	30							
	Время закрытой выдержки, с	30							
	Усилие запрессовки, кН	1							
	Время выдержки под давлением, с	30							
	Скорость приложения нагрузки, мм/мин	10	Расход клея, г/м ²	154,8–356,8					
Время до разрушения, мин	2,5 ± 0,5								

Таблица 5.11 – Результаты испытаний соединений на растяжение

Порядковый номер опыта	Маркировка (номер) образца	Величина зазора (натяга), мм	Высота шипа, мм	Расход клея, г/м ²	Предел прочности при растяжении, МПа
1	265a	0,1	6,00	168,00	28,24
2	261a	-0,1	6,21	173,20	46,72
3	263a	0	5,35	196,80	13,72
4	271a	-0,1	8,10	267,60	38,39
5	277a	0,2	10,30	310,40	46,70
6	259a	0,2	5,75	208,40	51,84
7	267a	0,2	6,10	173,20	43,26
8	269a	0,2	9,30	97,20	64,28
9	259б	0,2	6,70	208,40	48,26
10	267б	0,2	5,50	173,20	41,85
11	273a	0	9,80	150,00	44,92
12	261б	-0,1	5,30	173,20	42,84
13	275a	0,1	7,80	263,20	48,68
14	269б	0,2	9,30	97,20	76,44
15	277a	0,2	10,05	310,40	61,55
16	273б	0	9,80	150,00	24,63
17	275б	0,1	7,50	263,20	44,89
18	263б	0	6,00	196,80	46,12
19	271б	-0,1	7,90	267,60	23,90
20	265б	0,1	6,15	168,00	42,83

Таблица 5.11 – Результаты испытаний соединений на статический изгиб

Порядковый номер опыта	Маркировка (номер) образца	Величина зазора (натяга), мм	Высота шипа, мм	Расход клея, г/м ²	Предел прочности при изгибе, МПа
21	209	-0,1	7,00	216,4	45,51
22	211	0	7,00	233,6	38,80

Порядковый номер опыта	Маркировка (номер) образца	Величина зазора (натяга), мм	Высота шипа, мм	Расход клея, г/м ²	Предел прочности при изгибе, МПа
23	255	0,2	9,00	246,0	30,59
24	251	0,2	7,00	263,2	22,38
25	219	0	8,00	204,8	25,37
26	213	0,1	7	154,8	19,77
27	235	0	10	305,6	20,52
28	249	0,2	6	236,4	32,46
29	253	0,2	8	272,8	30,59
30	247	0,2	11	240,4	39,92
31	239	0,2	10	290,8	33,95
32	233	-0,1	10	222,4	35,81
33	215	0,2	7	237,6	23,50
34	201	-0,1	6	272,8	29,10
35	237	0,1	10	318,4	7,83
36	207	0,2	6	216,0	30,59
37	221	0,1	8	216,8	30,59
38	245	0,1	11	161,2	20,52
39	231	0,2	9	294,0	29,84
40	243	0	11	260,8	41,78
41	241	-0,1	11	244,0	36,56
42	205	0,1	6	207,6	27,98
43	229	0,1	9	232,0	31,34
44	223	0,2	8	192,4	30,59
45	257	0,2	10	254,8	39,17
46	203	0	6	356,8	38,80
47	217	-0,1	8	210,0	31,71
48	225	-0,1	9	181,6	37,31
49	227	0	9	279,2	29,84

5.4.2 Статистическая обработка и анализ результатов исследований влияния геометрических характеристик шипов и расхода клея на прочность соединений

Статистическая обработка данных проведена по методике, описанной в п. 3.5.2.4. Аналогичный анализ проведен в п. 4.4, поэтому ниже его результаты приведены в сокращенной форме.

5.4.2.1 Статистическая обработка данных, полученных при испытаниях соединений на растяжение, показала следующие результаты.

1) Мультиколлинеарность независимых переменных отсутствует, что позволяет проводить дальнейший анализ с участием всех факторов.

2) Наибольшая корреляция между независимыми переменными и зависимой переменной «Предел прочности на растяжение» наблюдается у переменной «Величина зазора (натяга)», коэффициент корреляции $\approx 0,52$ (заметная связь по шкале Чеддока [17-19, 106]. Для переменных «Высота шипа» и «Расход» клея коэффициенты корреляции составляют 0,37 и - 0,15, что говорит об их меньшем влиянии на зависимую переменную.

3) При генерировании модели с помощью процедуры «Общие регрессионные модели GRM» в программном пакете Statistica (рисунок 5.12) получены значения коэффициентов регрессии (5.1)

$$\sigma_{p.c} = 182,18 + 147,24Sh_n - 1200,19S - 0,32Sh_nR_k + 2,63SR_k + 0,05h_nR_k - 0,40R_k - 20,56h_n \quad (5.1)$$

Эффект	Оценки параметров (Таблица данных_Прочность соединений с посадками_Новая_Растяжение) Сигма-ограниченная параметризация									
	Предел прочности при растяжении, МПа Парам.	Предел прочности при растяжении, МПа Ст. Ош.	Предел прочности при растяжении, МПа t	Предел прочности при растяжении, МПа p	-95,00% Дов.инт	+95,00% Дов.инт	Предел прочности при растяжении, МПа Бета (?)	Предел прочности при растяжении, МПа Ст.Ош.?	-95,00% Дов.инт	+95,00% Дов.инт
Св.член	182,18	64,5710	2,82145	0,015418	41,50	322,872				
Величина зазора / натяга, мм	-1200,19	383,5705	-3,12900	0,008708	-2035,92	-364,465	-27,0171	8,63441	-45,8299	-8,20432
Высота шипа, мм	-20,56	7,7795	-2,64299	0,021455	-37,51	-3,611	-6,8205	2,58058	-12,4431	-1,19784
Расход клея на 1 м2, г	-0,40	0,1492	-2,67231	0,020324	-0,72	-0,074	-11,5991	4,34049	-21,0562	-2,14202
Величина зазора / натяга, мм*Высота шипа, мм	147,24	45,1984	3,25761	0,006859	48,76	245,718	26,1604	8,03053	8,6633	43,65739
Величина зазора / натяга, мм*Расход клея на 1 м2, г	2,63	0,8691	3,02606	0,010544	0,74	4,523	32,9465	10,85455	9,1965	56,49652
Высота шипа, мм*Расход клея на 1 м2, г	0,05	0,0183	2,69182	0,019604	0,01	0,089	16,3085	6,05856	3,1081	29,50901
Величина зазора / натяга, мм*Высота шипа, мм*Расход клея на 1 м2, г	-0,32	0,1036	-3,06752	0,009762	-0,54	-0,092	-33,8553	11,03672	-57,9023	-9,80838

Рисунок 5.12 – Оценки параметров регрессии

4) В полученной модели (5.1) члены регрессии расположены в порядке их значимости (рисунок 5.13). Модель и карта Парето подтверждают результаты корреляционного анализа: переменная «Величина зазора (натяга)» является наиболее значимой из независимых переменных.

5) На основании изучения частотной гистограммы, нормально-вероятностного графика и диаграммы рассеяния остатков (рисунок 5.14) сделано заключение о высоком качестве полученной модели (5.1), поскольку остатки регрессионной модели распределены нормально (рисунок 5.14 а) и не зависят от предсказанных значений отклика (рисунок 5.14 б).



Рисунок 5.13 – Карта Парето

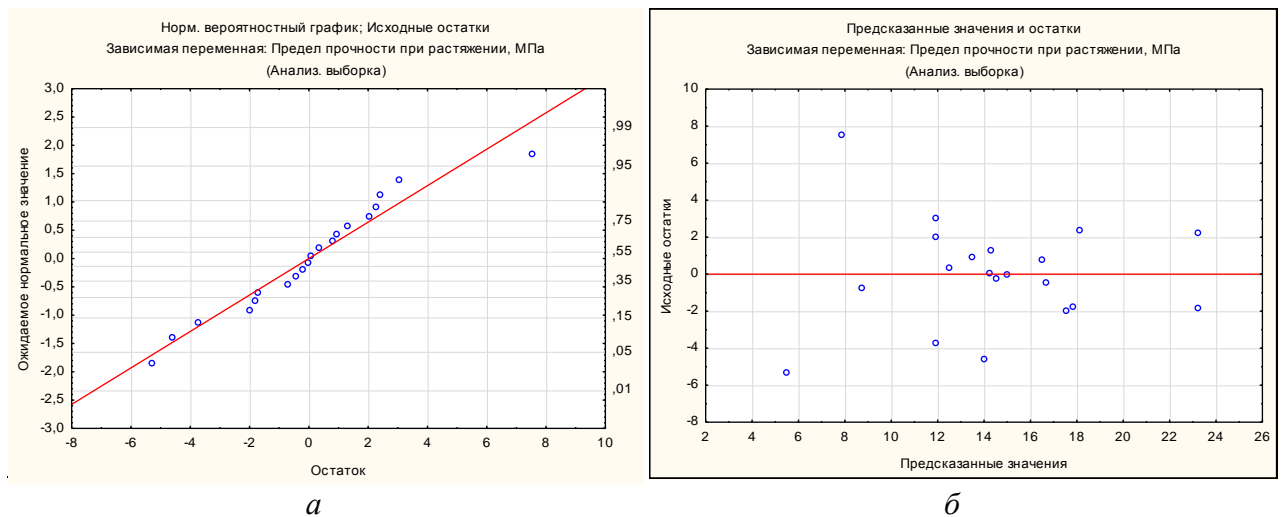


Рисунок 5.14 – Графическое представление нормальности распределения остатков: *а* – нормально-вероятностный график; *б* – диаграмма рассеяния

6) Дисперсионный анализ подтверждает статистическую значимость регрессии (рисунок 5.15). Уровень значимости F -критерия меньше, чем заданный уровень значимости: $p = 0,00156 < 0,05$, следовательно, регрессия высоко значима.

Зависим. Перемен.	SS модели и SS остатков (Таблица данных Прочность соединений с посадками Новая Растяжение)										
	Множест. R	Множест. R2	Скоррект R2	SS Модель	сс Модель	MS Модель	SS Остаток	сс Остаток	MS Остаток	F	p
Предел прочности при растяжении, МПа	0,840343	0,706176	0,534779	379,0591	7	54,15130	157,7179	12	13,14316	4,120113	0,015600

Рисунок 5.15 – Результаты дисперсионного анализа

7) Значение коэффициента детерминации составило $R^2 \approx 0,706$ (рисунок 5.12), т.е. отклик изменяется на 70 % под воздействием всех факторов, входящих в модель. Высокое значение R^2 указывает на верный выбор формы описания связи переменных.

8) Для практических целей упрощенного расчета может быть полезна линейная модель с более низким коэффициентом детерминации $R^2 \approx 0,405$, но с достаточным уровнем значимости $p = 0,0361 < 0,05$ (рисунок 5.16 а):

$$\sigma_{p.c} = 10,04 + 19,23 S \quad (5.2)$$

Статистически значимый (рисунок 5.16 б) положительный коэффициент фактора S показывает, что с увеличением натяга предел прочности на растяжение увеличивается. При увеличении S на 0,1 мм предел прочности возрастает на 1,92 МПа. При изменении характеристик посадки с зазора, равного - 0,1 мм, до натяга, равного 0,2 мм, прочность соединения увеличится в среднем на 39,27 %.

5.4.2.2 Статистическая обработка данных, полученных при испытаниях соединений на статический изгиб, проведенная аналогично изложенной выше методике, показала следующие результаты.

Наиболее значимой из независимых переменных является переменная «Величина зазора (натяга)», что обнаруживается в результате генерирования как линейной, так и полиномиальной модели (рисунок 5.17 а, б).

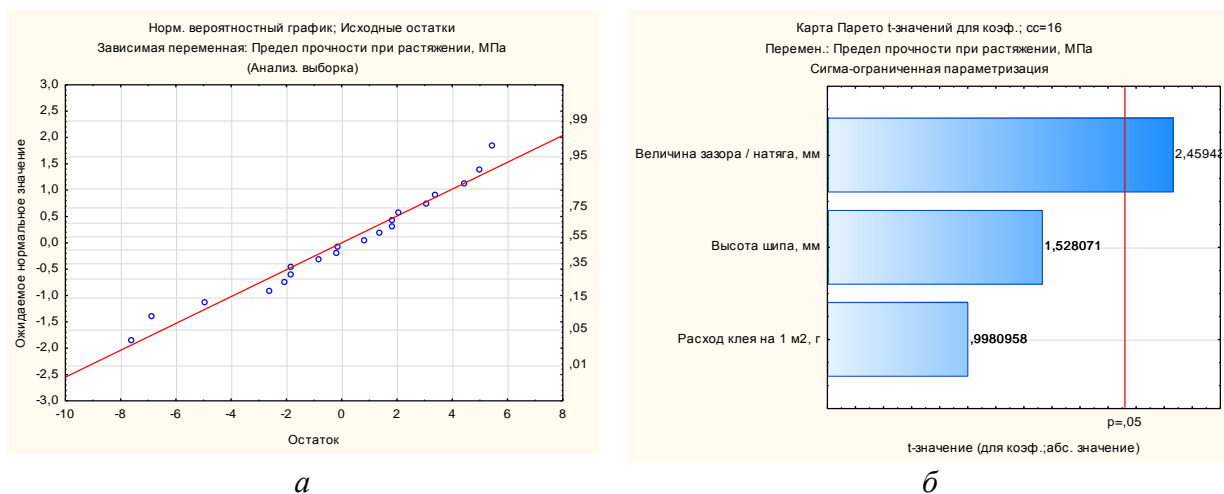


Рисунок 5.16 – Графическое представление характеристик линейной модели:
а – нормально-вероятностный график остатков; б – карта Парето

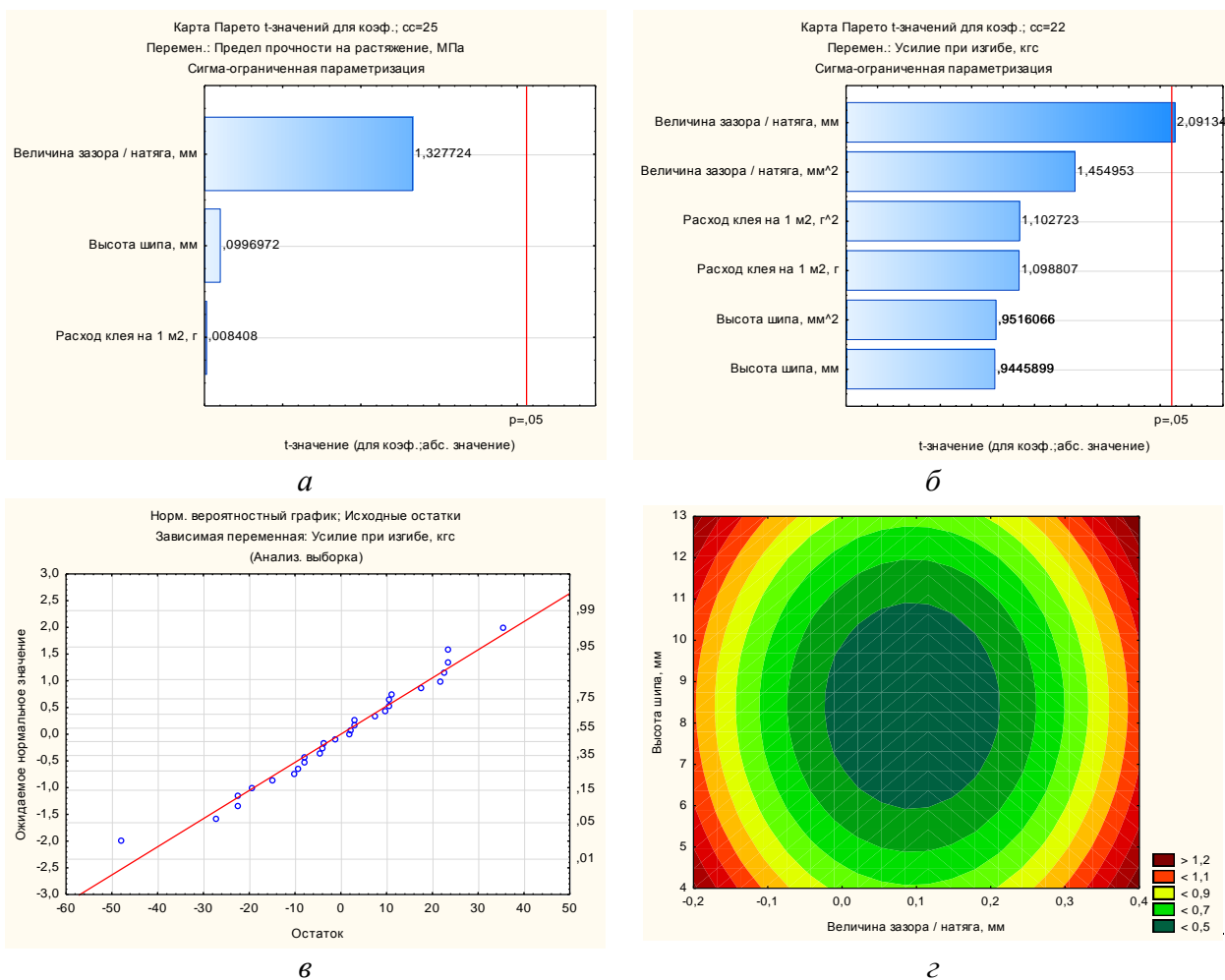


Рисунок 5.17 – Графическое представление характеристик регрессионной модели:
а, б – карты Парето; в – нормально-вероятностный график остатков;
г – контуры желательности

Регрессионная модель на основании оценки ее параметров (рисунок 5.18) может быть представлена в виде:

$$\sigma_{iz.c} = 81,28 - 122,49S + 631,29S^2 + 0,33R_k + 1,49h_n^2 - 25,09h_n . \quad (5.3)$$

Эффект	Оценки параметров (Таблица данных Прочность соединений с посадками Новая Изгиб) Сигма-ограниченная параметризация									
	Усилие при изгибе, кгс Парам.	Усилие при изгибе, кгс Ст. Ош.	Усилие при изгибе, кгс t	Усилие при изгибе, кгс p	-95,00% Дов. инт	+95,00% Дов. инт	Усилие при изгибе, кгс Бета (?)	Усилие при изгибе, кгс Ст.Ош.?	-95,00% Дов. инт	+95,00% Дов. инт
Св.член	81,278	132,8936	0,61160	0,547070	-194,326	356,882				
Величина зазора / натяга, мм	-122,493	58,5714	-2,09135	0,048259	-243,963	-1,023	-0,68302	0,326595	-1,36034	-0,005707
Величина зазора / натяга, мм ²	631,294	433,8928	1,45495	0,159803	-268,545	1531,132	0,50173	0,344845	-0,21343	1,216897
Высота шипа, мм	-25,085	26,5569	-0,94459	0,355128	-80,161	29,990	-2,00829	2,126095	-6,41754	2,400963
Высота шипа, мм ²	1,490	1,5654	0,95161	0,351635	-1,757	4,736	2,02227	2,125107	-2,38494	6,429467
Расход клея на 1 м ² , г	0,331	0,3011	1,09881	0,283732	-0,294	0,955	1,78400	1,623582	-1,58310	5,151107
Расход клея на 1 м ² , г ²	-0,000	0,0002	-1,10272	0,282065	-0,001	0,000	-1,79666	1,629298	-5,17562	1,582293

Рисунок 5.18 – Оценки параметров регрессии

Качество полученной модели достаточное, так как остатки регрессионной модели распределены нормально (рисунок 5.17 в) и не зависят от предсказанных значений отклика. Значение коэффициента детерминации составило $R^2 \approx 0,3$, т.е. отклик изменяется на 30 % под воздействием всех факторов, входящих в модель. Недостаточно высокое значение R^2 может быть обусловлено вариативностью свойств древесины, условиями склеивания или другими не учтенными факторами. Тем не менее, прогноз по такой модели будет точнее, чем прогноз по средним значениям.

Результат построения поверхностей и контуров желательности показал, что оптимальные значения натяга находятся в диапазоне 0,05 – 0,2 мм, высоты шипа – в диапазоне 6 – 10,6 мм, клея – до 120 г/м². Пример графического представления функции желательности представлен на рисунке 5.17 г.

Полученные результаты согласуются со сделанными ранее теоретическими выводами (п. 1.2, 2.4).

5.5 Выводы

5.5.1 По совокупности исследованных показателей соединения на пресованные прямоугольные шипы имеют высокое качество и могут быть рекомендованы для изготовления клееных деревянных конструкций, столярно-

строительных и других изделий. Прочность исследованных соединений удовлетворяет требованиям стандартов. Соединения соответствуют классам прочности пиломатериалов до класса С30 включительно и могут быть отнесены к классу прочности элементов конструкций К36 (на примере для заготовок из древесины сосны) в соответствии с ГОСТ 33080, ГОСТ 33081, ГОСТ 20850. Среднее значение относительной прочности соединений при растяжении достигает 56 %, при изгибе – 80 % (сосна); лучшие значения получены для соединений с мелкими шипами (толщиной порядка 2 мм, длиной 10 мм).

5.5.2 Процесс местного торцового прессования обеспечивает высокую точность формирования шипов не ниже 13 качества. Дно проушины имеет низкую шероховатость с максимальной высотой неровностей не более 86 мкм.

5.5.3 Макроструктура пластически деформированной зоны в образцах из древесины сосны получила высокие оценки по эстетичности внешнего вида – преимущественно на 4 и 5 баллов. Образцы из древесины березы показали удовлетворительные результаты (3 балла), из древесины дуба – ниже среднего.

5.5.4 Величина зазора (натяга) по толщине шипов существенно влияет на прочность соединений. С увеличением натяга прочность на растяжение и изгиб увеличиваются. Оптимальные значения натяга находятся в диапазоне 0,05 – 0,2 мм. Использование посадки с натягом 0,2 мм позволяет повысить прочность соединения на 39 % по сравнению с посадкой с зазором 0,1 мм.

Длина шипов является менее значимым параметром. Оптимальные значения высоты шипа находятся в диапазоне 6 – 10,6 мм.

Расход клея в исследованном диапазоне малозначимо влияет на прочностные показатели соединений. Оптимальный расход клея – не более 120 г/м².

6 ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ ТЕХНОЛОГИИ ФОРМИРОВАНИЯ ШИПОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ НА ОСНОВЕ СПОСОБА ТОРЦОВОГО ПРЕССОВАНИЯ

Эффективность процесса сращивания обеспечивается выбором наиболее рациональных параметров проектируемого соединения, выбором оптимального варианта оборудования и оснастки из числа возможных альтернатив. Для решения данной многокритериальной задачи необходима разработка научно обоснованной методики оценки эффективности соединений, включающей систематизированную информацию об альтернативных вариантах и разработку системы критериев оценки.

В разделе представлены основные положения методики оценки эффективности и рекомендации по внедрению технологии сращивания на прямоугольные прессованные шипы. Методика показана на примере разработки технологического процесса сращивания заготовок для изготовления дверной филенки.

Представленные в разделе результаты исследований опубликованы в работах автора [82, 123, 125, 170, 172, 173, 188, 204, 205, 207, 208, 201, 211, 213-219, 221-224, 226-228, 230, 279, 280].

6.1 Методика оценки эффективности шиповых соединений

6.1.1 Алгоритм оценки и выбора шиповых соединений различного назначения

Алгоритм оценки и выбора шиповых соединений различного назначения, необходимого технологического оборудования и оснастки (рисунок 6.1) включает три этапа:

- 1) выбор параметров шипового соединения;
- 2) выбор наиболее эффективного оборудования;

3) выбор наиболее эффективной оснастки.

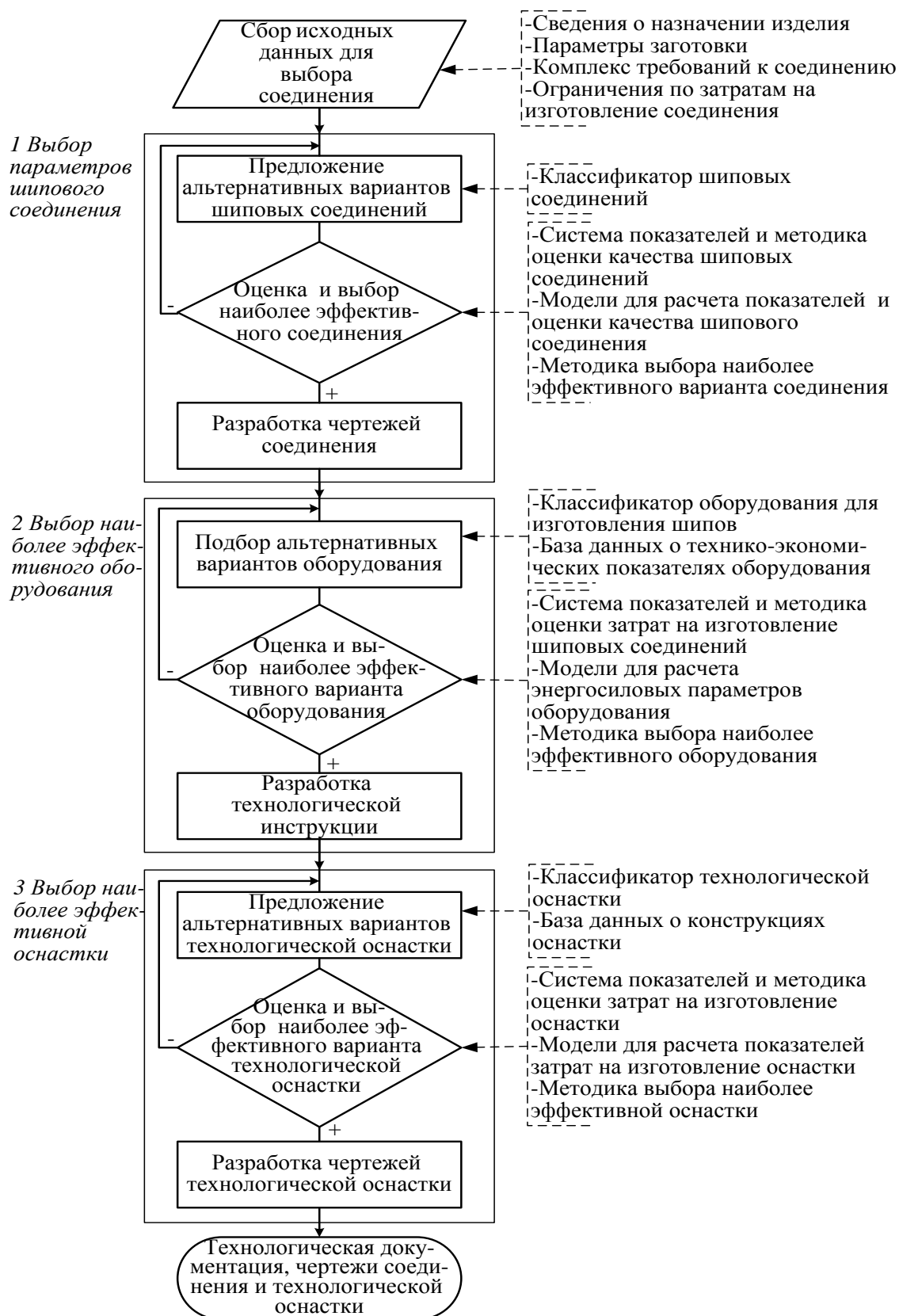


Рисунок 6.1 – Алгоритм выбора шиповых соединений различного назначения, оборудования и оснастки для прессования

В состав исходной информации для разработки техпроцесса изготовления шиповых соединений входят:

- сведения о функциональном назначении изделия;
- сведения о параметрах заготовки (размеры заготовки, порода древесины, влажность, направление волокон);
- комплекс требований к соединению (технические требования заказчика к изделию, государственные стандарты на соединение);
- ограничения по себестоимости соединения (на основании данных предприятия и маркетинговых исследований).

Для выполнения этапов 1 – 3 необходимы:

- 1) классификаторы шиповых соединений, оборудования для прессования шипов и проушин и технологической оснастки;
- 2) система показателей качества соединений, критерии эффективности оборудования и оснастки;
- 3) методики оценки качества шипов и выбора наиболее эффективного варианта, методики оценки эффективности оборудования и оснастки и выбора наиболее эффективных из них;
- 4) модели для расчета показателей и оценки качества шипового соединения, модели для расчета энергосиловых параметров оборудования;
- 5) банк данных об оборудовании и конструкциях оснастки.

Этап 1 включает разработку альтернативных вариантов шиповых соединений с учетом исходных данных на основе разработанного классификатора соединений. Производится оценка качества альтернативных вариантов соединений с использованием показателей качества соединения и выбор оптимального варианта с использованием дифференциального и комплексного методов квалиметрии. При неудовлетворенности результатами выбора производится корректировка типа и размеров соединения. Затем разрабатываются чертежи соединения.

На 2 этапе производится подбор альтернативных вариантов оборудования для прессования шипов с использованием классификатора и банка дан-


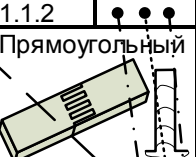
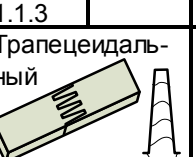
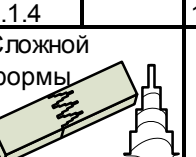
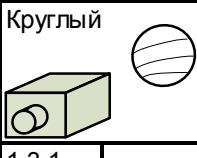
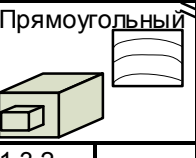
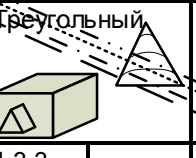


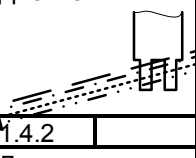
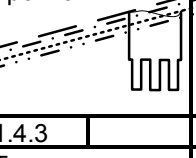

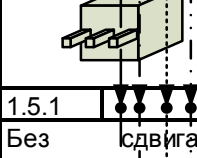
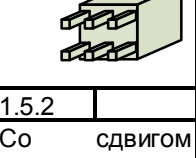

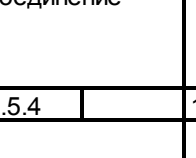
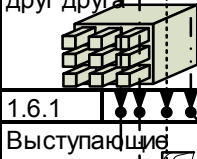

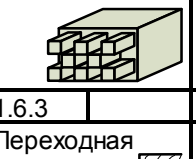


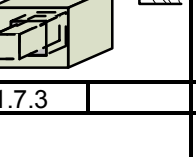




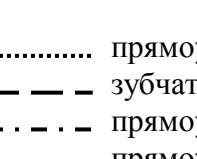
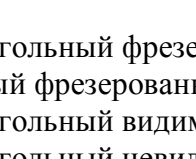
ных об оборудовании. Затем производится оценка эффективности оборудования с использованием выбранных критериев по разработанной методике оценки. Далее следует выбор наиболее эффективного варианта оборудования по комплексному показателю «Конкурентоспособность шипового соединения», который включает показатели качества соединения и себестоимости изготовления соединения, с использованием дифференциального и (или) комплексного методов квалиметрии. При неудовлетворенности показателями конкурентоспособности осуществляется разработка и оценка других альтернативных вариантов. Затем разрабатывается технологическая документация.

На 3 этапе производится разработка альтернативных вариантов технологической оснастки с использованием классификатора. Затем производится оценка альтернативных вариантов оснастки по разработанной методике оценки эффективности с использованием системы критериев. Далее следует выбор наиболее эффективного варианта оснастки. При удовлетворенности результатами выбора производят разработку чертежей оснастки, иначе – корректируют вид оснастки.

6.1.2 Выбор параметров соединения

6.1.2.1 Разработка альтернативных вариантов соединений.

Разработанный классификатор шиповых соединений (рисунок 6.2) позволяет изучить конструктивно-технологические свойства номенклатуры деталей предприятия, выделить типовые детали, обладающие общностью признаков классификации. В состав предлагаемого классификатора входят наиболее значимые критерии, соответствующие возможностям известных и разрабатываемых техпроцессов изготовления шиповых соединений. Задачей классификации является определение формы и расположения шипов.

1.1		1.1.1		1.1.2		1.1.3		1.1.4		1.1.5	
По форме продольного сечения шипа		Треугольный		Прямоугольный		Трапецеидаль- ный		Сложной формы			
1.2		1.2.1		1.2.2		1.2.3		1.2.4		1.2.5	
По форме поперечного сечения шипа		Круглый		Прямоугольный		Треугольный		Сложной формы			
1.3		1.3.1		1.3.2		1.3.3		1.3.4		1.3.5	
По количеству шипов		Одинарный		Двойной		Тройной		Многоспиговое соединение			
1.4		1.4.1		1.4.2		1.4.3		1.4.4		1.4.5	
По количеству рядов шипов		Один ряд		Два ряда		Три ряда		Многорядное соединение			
1.5		1.5.1		1.5.2		1.5.3		1.5.4		1.5.5	
По расположению рядов		Без сдвига относительно друг друга		Со сдвигом относительно друг друга		В шахматном порядке					
1.6		1.6.1		1.6.2		1.6.3		1.6.4		1.6.5	
По расположению шипов относительно торца заготовки		Выступающие		Внутренние		Переходная форма					
1.7		1.7.1		1.7.2		1.7.3		1.7.4		1.7.5	
По выходу на пласть заготовки		Видимые		Невидимые							
1.8		1.8.1		1.8.2		1.8.3		1.8.4		1.8.5	
По выходу на кромку заготовки		Видимые		Невидимые							
1.9		1.9.1		1.9.2		1.9.3		1.9.4		1.9.5	
По конструкции шипа		Цельный		Вставной							

- прямоугольный фрезерованный шип С2
 - - - - - зубчатый фрезерованный шип С3
 - - - - - - прямоугольный видимый прессованный шип С4
 - - - - - - прямоугольный невидимый прессованный шип С5

Рисунок 6.2 – Классификатор шиповых соединений с примерами выбора альтернативных вариантов

Признаки классификации выбраны таким образом, чтобы удалось разделить все многообразие деталей на отдельные группы. Учтены продольное и поперечное сечение шипа, количество шипов в ряду, количество и расположение рядов шипов по торцу заготовки, положение шипа относительно торца, видимость шипов относительно пласти и кромки заготовки, конструкция шипа. Для однозначной характеристики шипового соединения необходимо указать все девять признаков. Каждое подмножество типовых деталей будет определяться графом.

Выбор параметров соединения осуществляли, исходя из цели и задач, поставленных предприятием ООО «Техноресурс» при разработке конструкции и технологии изготовления дверной филенки с использованием соединений по длине на прессованные шипы. Цель внедрения – сокращение затрат на изготовление шиповых соединений ламелей мебельного щита, являющегося заготовкой для дверной филенки (рисунок 6.3). Предприятием были поставлены задачи: разработать технические предложения по конструкции шиповых соединений; дать рекомендации по геометрическим размерам и режимам прессования элементов шиповых соединений; дать рекомендации по выбору прессового оборудования и оснастки.

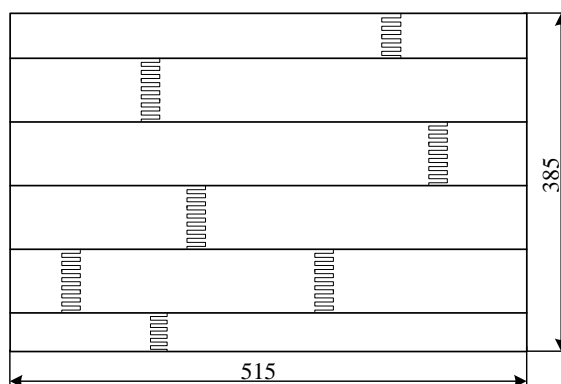


Рисунок 6.3 – Заготовка для дверной филенки (мебельный щит)

Для начала работы с алгоритмом обобщили исходную информацию для выбора параметров шипового соединения. Соединение применяется при изготовлении мебельного щита, предназначенного для мелкосерийного изго-

товления дверной филенки. К соединению дялянок щита предъявляются требования предприятия и государственных стандартов [53, 59, 73, 67]:

- порода древесины – сосна;
- размеры заготовки: сечение 20×35 мм, длина 150 – 600 мм;
- влажность заготовок 9 – 11 %;
- точность формирования шипов – 13 квалитет по ГОСТ 6449.1;
- расположение клеевого шва относительно пласти склеиваемых заготовок – вертикальное;
- параметр шероховатости поверхностей склеивания шипов $R_{m\ max} \leq 200$ мкм;
- зазор в стыках – не более 5 % длины шипов;
- наклон волокон – не более 5 %;
- прочность соединения на изгиб не менее 26 МПа;
- длина шипа – не более 10 мм;
- в зоне соединения не допускаются сучки;
- на предприятии используется клей поливинилацетатный ПВА марки «Супер» производства АО «АКРОН», г. Великий Новгород, ТУ 2385-030-00203789-99.

На первом этапе провели разработку предложений по конструкциям и размерам альтернативных вариантов соединений на основе классификатора (рисунок 6.2).

В качестве альтернативных вариантов предложены соединения:

- С1 – впритык на гладкую фугу (рисунок 6.4 а);
- С2 – на прямоугольные шипы, изготавливаемые фрезерованием (рисунок 6.4 б);
- С3 – на зубчатые шипы, изготавливаемые фрезерованием (рисунок 6.4 в);
- С4 – на прямоугольные шипы, видимые по пласти, изготавливаемые прессованием (рисунок 6.4 г);

- С5 – на прямоугольные шипы, невидимые по пласти, видимые по кромке, изготавливаемые прессованием (рисунок 6.4 д).

Признаки альтернативных вариантов соединений показаны на классификаторе (рисунок 6.2) с помощью графов, за исключением соединения С1, которое не относится к шиповым.

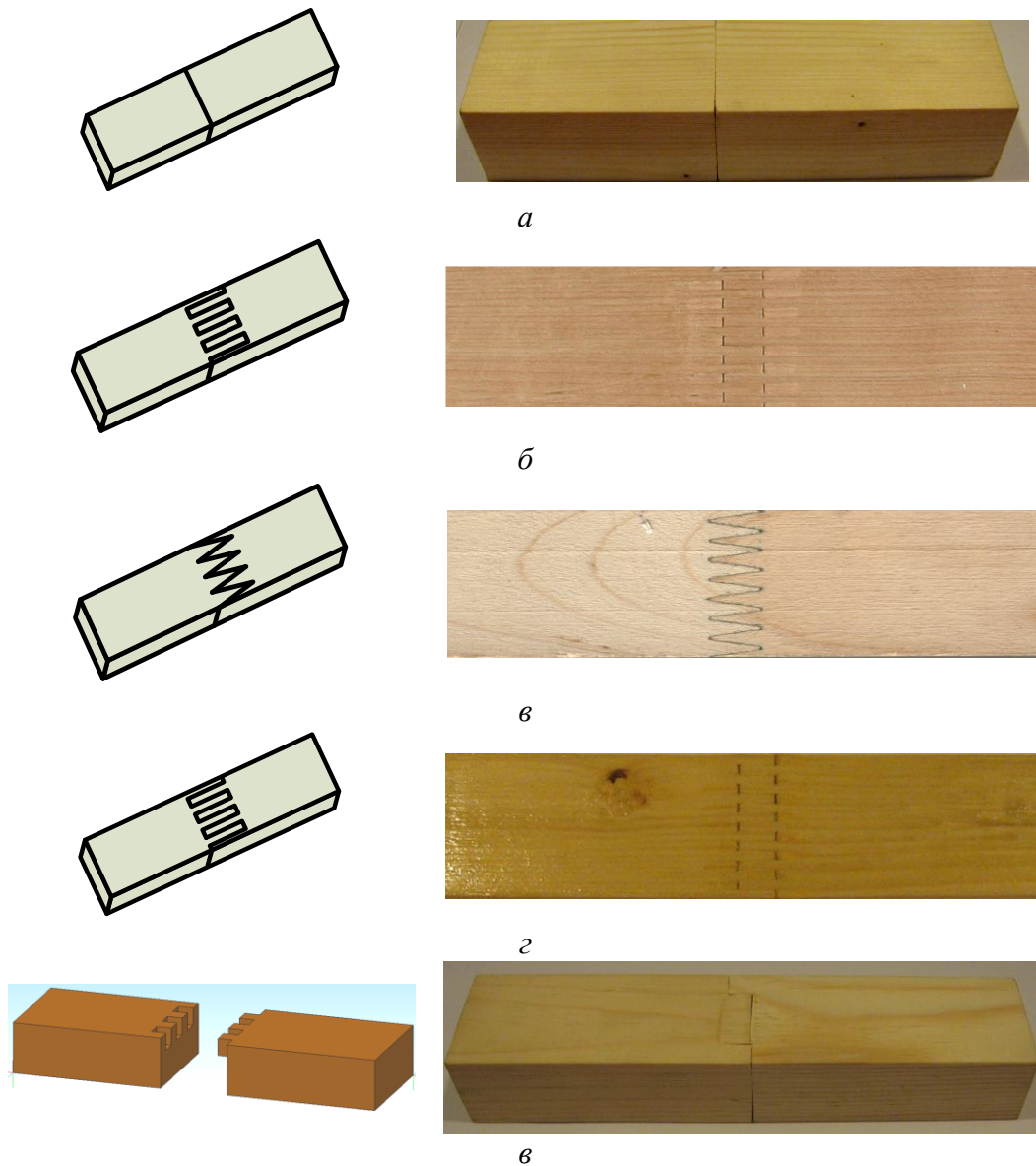


Рисунок 6.4 – Эскизы и фотографии альтернативных вариантов соединений:
a – С1; *б* – С2; *в* – С3; *г* – С4; *д* – С5

Размеры шиповых соединений принимаются, исходя из комплекса требований к соединению. Соединение на зубчатые шипы (соединение С3), применявшееся ранее на предприятии, имеет следующие размеры: длину

шипа – 10 мм, шаг шипа – 3,8 мм, затупление – 0,65 мм (рисунок 6.5 *а*). Длина, шаг и толщина прямоугольных шипов (С2, С4, С5) аналогичны, ширина проушины – 2 мм (рисунок 6.5 *б*). Ширина перемычек соединения С5 – 3 мм (рисунок 6.5 *в*).

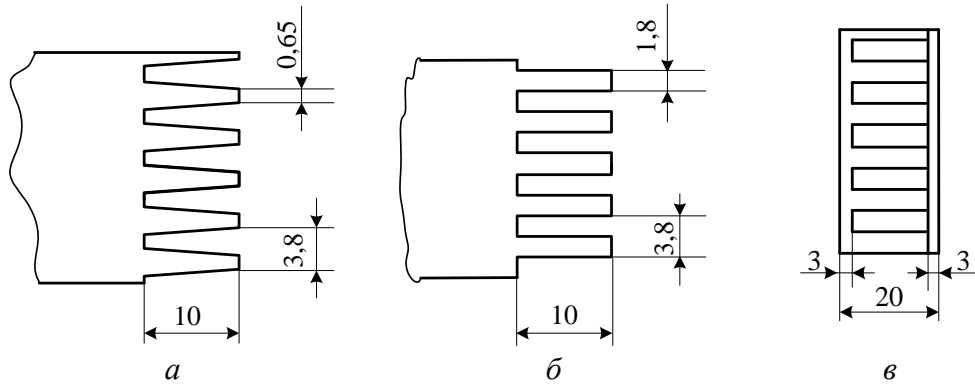


Рисунок 6.5 – Размеры соединений: *а* – С3; *б* – С2 и С4; *в* – С5

6.1.2.2 Оценка альтернативных вариантов.

Для оценки уровня качества альтернативных вариантов соединений воспользовались приемами, применяемыми в оценке качества продукции [27, 281]. Схема оценки качества представлена на рисунке 6.6.

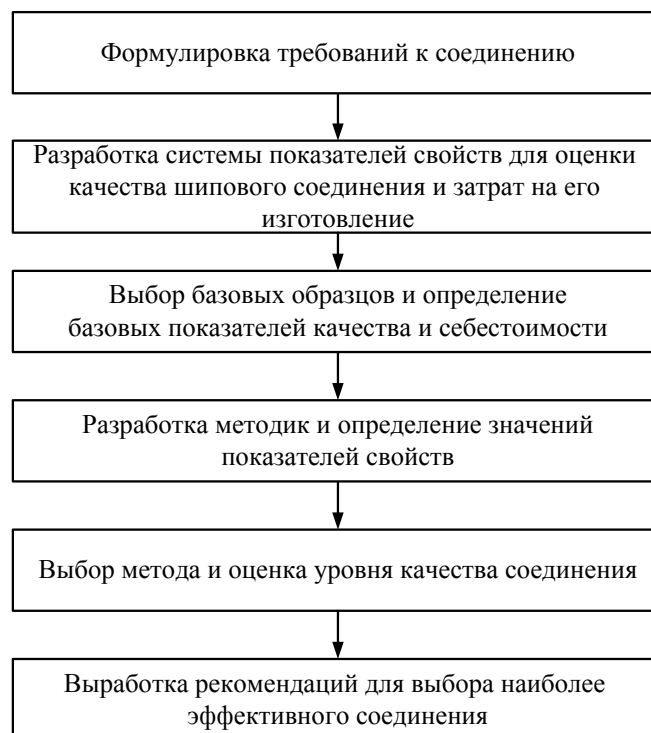


Рисунок 6.6 – Основные этапы оценки уровня качества соединений

Развернутая номенклатура показателей качества (т.е. номенклатура для конкретного вида изделий) сформирована на основе нормативно-технической документации на клеевые шиповые соединения и изделия с их применением [54-57, 67, 193, 237, 241, 249-255], типового перечня показателей качества продукции [281], стандартной номенклатуры показателей качества для изделий с применением клеевых соединений [64-66], результатов исследований в области качества клеевых соединений [32, 44, 45, 53, 60, 73, 96, 113, 115, 116, 132, 133, 183, 231, 246].

В номенклатурный перечень (таблица А.1 Приложения А) вошли 11 групп показателей 1 уровня: показатели назначения, надежности, технологичности, транспортабельности и другие [281]. На 2 уровне находятся подгруппы типовых показателей; например, в группу показателей назначения включены показатели классификационные, функциональные, технической эффективности и другие. На 3 уровне выявлено 57 комплексных показателей, например, среди классификационных показателей – прочность склеивания, физико-механические характеристики древесины, геометрические размеры соединения. Уровень 4 включает 117 единичных показателей, например комплексный показатель «прочность склеивания» можно оценить единичными показателями «предел прочности при растяжении», «предел прочности при статическом изгибе» и др.

В номенклатуру показателей для оценки качества соединения в заданных условиях предприятия, при известной цели оценки (в конкретную номенклатуру [281]) должны входить наиболее значимые показатели. В результате анализа приведенных в научно-технических источниках данных [32, 44, 45, 53-57, 60, 64-67, 73, 96, 113, 115, 116, 132, 133, 183, 193, 231, 237, 241, 246, 249-255, 281], учитывая цель оценки и экспертные мнения, необходимыми и достаточными признаны следующие единичные показатели качества шипового соединения:

- глубина деформированной зоны;
- изменение макроструктуры деформированной зоны;

- шероховатость граней проушины;
- твердость дна проушины;
- прочность соединения по длине на растяжение;
- прочность соединения по длине на изгиб.

Таким образом, комплексный показатель «качество шипового соединения $K_{ис}$ » оценивается по ряду единичных показателей, приведенных на рисунке 6.6. Комплексный показатель «Качество шипового соединения $K_{ис}$ » (характеризующий технический уровень) входит в обобщенный критерий оценки уровня качества соединения – «Конкурентоспособность шипового соединения», включающий также комплексный показатель «Затраты на изготовление соединения $C_{ис}$ » (см. п. 1.3.4).

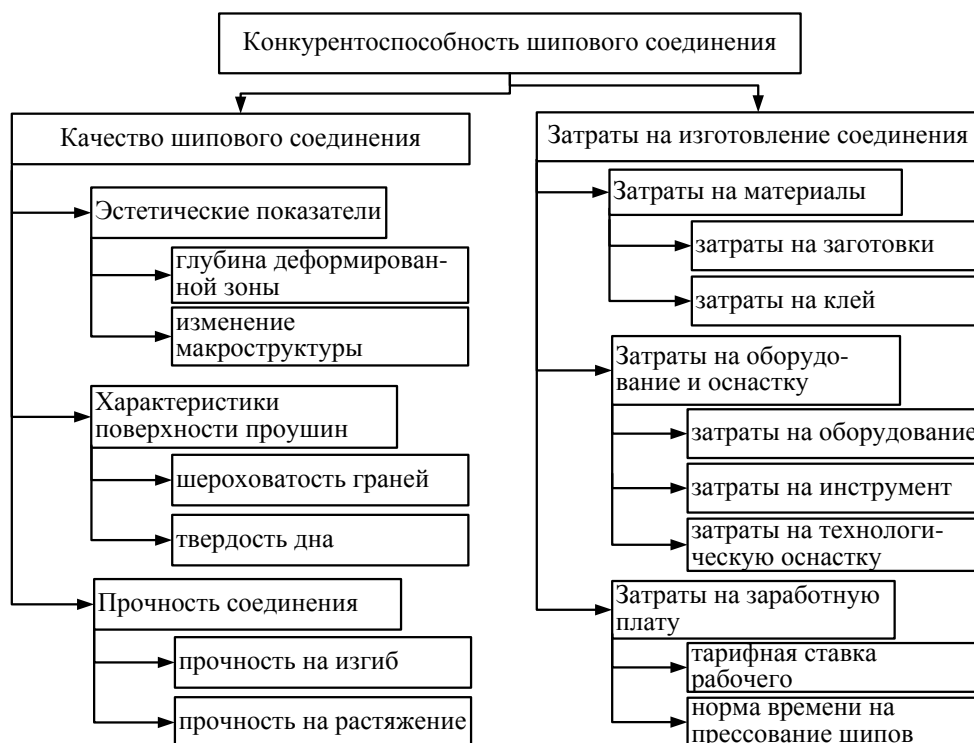


Рисунок 6.7 – Система показателей для оценки конкурентоспособности шиповых соединений

Для определения значений единичных показателей уровня качества (технического уровня) альтернативных вариантов соединений использовали

модели и результаты экспериментальных оценок, полученные в разделах 2–5. Результаты оценки приведены в таблице 6.1.

Таблица 6.1 – Значения показателей качества соединений

Наименование показателя	Значения показателей качества				
	C1	C2	C3	C4	C5
Предел прочности на изгиб σ_{izgW} , МПа	4,8	53	52	51	58
Предел прочности на растяжение σ_{rW} , МПа	5,2	56	68	49	59
Шероховатость поверхностей склеивания $R_{m\ max}$, мкм	125	200	210	83	81
Относительное увеличение твердости дна проушины HRL , %	0	0	0	154	149
Глубина деформированной зоны h_3 , %	2	27	25	25	22
Изменение макроструктуры M , балл	4,8	4,0	4,2	3,9	4,7

Для расчета уровня качества соединений предлагается использовать квалиметрические методы дифференциальной и комплексной оценки качества. Дифференциальный метод позволяет оценить уровень качества по отдельным показателям, путем сопоставления с соответствующими показателями базового образца (лучшего из известных соединения по длине). При этом можно определить, насколько качество оцениваемого соединения соответствует качеству базового образца; какие показатели свойств соответствуют или не соответствуют показателям свойств базового образца и как от них отличаются. Учитываются наиболее значимые свойства объекта, условно считаясь равнозначными. Таким образом, дифференциальный метод позволит количественно оценить и принять решения по отдельным свойствам соединения, без учета весомости каждого показателя. Метод может быть использован на первом, предварительном этапе оценки уровня качества соединения, при определении возможности использования соединения для изготовления изделий из древесины.

Комплексный метод используется на следующем этапе, с целью более точной оценки качества соединения. Он позволяет учитывать совокупность

свойств соединения с учетом их весомости, которая в зависимости от целей оценки может определяться различными методами [27, 221, 281]. Экспертный метод определения коэффициентов весомости учитывает мнение группы экспертов и может быть применен при внедрении соединения в производство конкретного изделия. Метод предельных и номинальных значений базируется на использовании данных, приведенных в стандартах, поэтому позволит оценить качество соединения относительно нормативных требований.

Для рассматриваемого примера на предварительном этапе оценки использован дифференциальный метод расчета уровня качества (рисунок 6.8), на следующем – комплексный метод (рисунок 6.9).

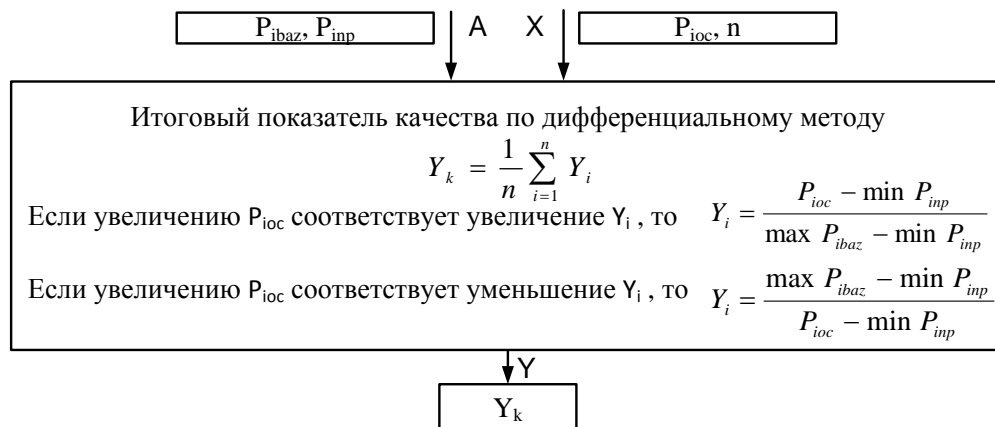


Рисунок 6.8 – Модель для расчета комплексного показателя качества по дифференциальному методу



Рисунок 6.9 – Модель для расчета комплексного показателя уровня качества по средневзвешенным арифметическим значениям свойств

В приведенных на рисунках 6.8 и 6.9 формулах использованы следующие обозначения:

- Y_k – итоговый показатель качества соединения (уровень качества);
- n – количество показателей свойств;
- Y_i – относительный показатель i -го свойства оцениваемого и базового образцов соединений;
- P_{ioc} – значение i -го единичного показателя свойств соединения;
- P_{inp} – предельно допустимое значение показателя P_{ioc} (наибольшее или наименьшее регламентированное значение показателя продукции);
- P_{ibaz} – значение i -го показателя базового образца.

При расчетах в качестве базовых значений приняты значения показателей качества наилучших на данный момент образцов соединений по длине, используемых на практике – соединений на зубчатый шип, полученных фрезерованием. В качестве номинальных – значения, приводимые в требованиях предприятия, а также в справочной литературе. В качестве предельных – наибольшие или наименьшие регламентированные стандартами значения показателей. Результаты расчетов уровня качества по дифференциальному методу приведены в таблице 6.2. Лепестковая диаграмма, построенная для анализа полученных результатов, приведена на рисунке 6.10.

Таблица 6.2 – Значения показателей и уровня качества соединений

Наименование показателя	Единицы измерения	Базовое значение P_{ibaz}	Номинальное значение P_{in}	Предельное значение P_{inp}	Y_{ka}									
					C1		C2		C3		C4		C5	
					Y_j	Y_{ka}	Y_j	Y_{ka}	Y_j	Y_{ka}	Y_j	Y_{ka}	Y_j	Y_{ka}
σ_{uz2W}	МПа	92,39	62,55	20	0,21	0,49	0,46	0,29	0,44	0,34	0,42	0,47	0,52	0,57
σ_{pW}	МПа	111,22	81,65	26	0,24		0,35		0,49		0,26		0,39	
$R_{m\ max}$	МкМ	11,7	63,00	200	0,40		0,00		0,00		0,64		0,64	
HRL	%	200	50,00	35	0,21		0,21		0,21		0,72		0,72	
h	%	0	10,00	35	0,97		0,24		0,29		0,32		0,32	
M	Балл	5	4,00	3	0,90		0,50		0,60		0,45		0,85	

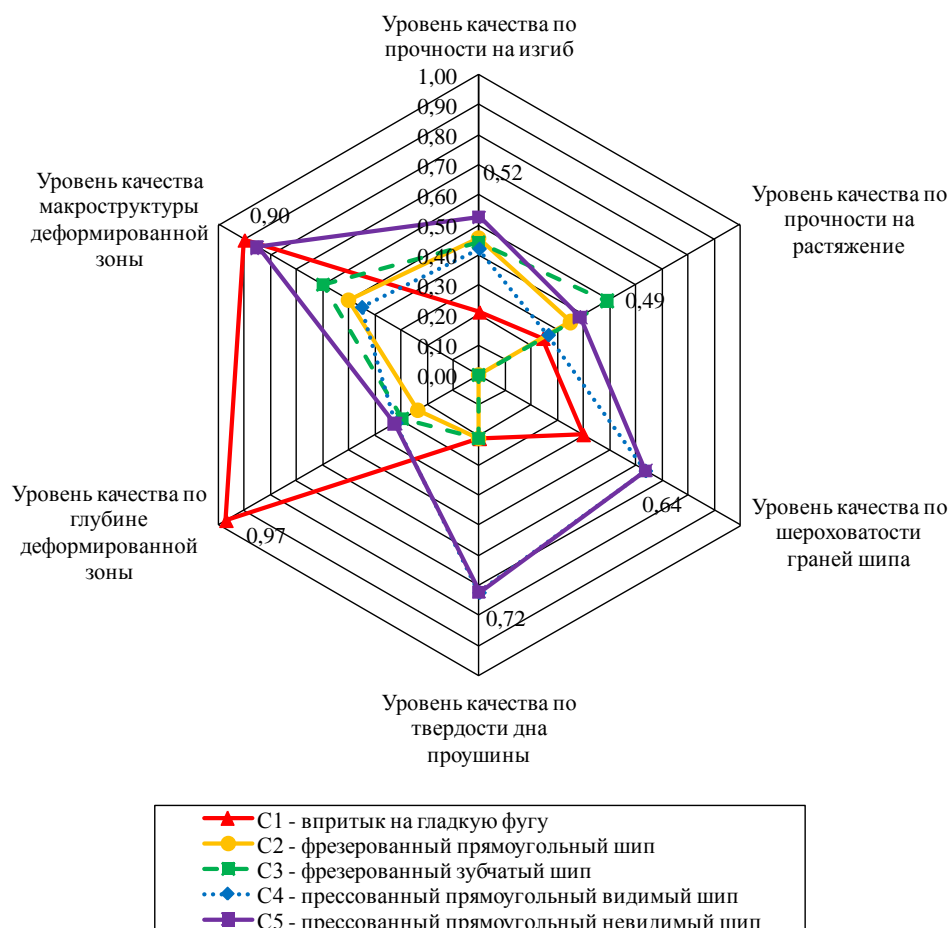


Рисунок 6.10 – Результаты дифференциальной оценки качества альтернативных вариантов соединений по длине

В результате анализа полученных значений показателей выявлено, что в целом показатели качества вариантов C2, C3, C4, C5 соответствуют требованиям, предъявляемым к соединениям по длине. Показатели прочности варианта C1 не соответствуют требованиям, предъявляемым к соединениям по длине. Следовательно, вариант C1 исключается из числа возможных альтернатив.

Из оставшихся четырех вариантов по результатам дифференциальной оценки качества наилучшими являются C5 (соединение на прямоугольный шип, невидимый по пласти, видимый по кромке, изготавливаемое прессованием), C4 (соединение на прямоугольный шип, видимый по пласти, изготавливаемое прессованием), C3 (соединение на зубчатый шип, изготавливаемое фрезерованием).

Вместе с тем дифференциальный метод определения уровня качества не дает точной оценки, и следует провести дополнительные расчеты, учитывающие весомость показателей – воспользоваться комплексным методом (рисунок 6.9). Уточненные значения уровней качества по комплексному методу [82, 123, 188, 205, 207, 208, 211, 216, 279-281] для соединений С3, С4, С5 составили соответственно 0,27; 0,84; 0,86, т.е. последние два типа соединений существенно превосходят по качеству соединение С3. Вместе с тем для дальнейшей проработки принимаются три варианта, поскольку далее в оценке конкурентоспособности участвуют экономические показатели, которые могут существенно различаться для технологий фрезерования и прессования.

6.1.3 Выбор наиболее эффективного оборудования и оснастки

6.1.3.1 Подбор альтернативных вариантов оборудования

На втором этапе работы производили выбор прессового оборудования и оснастки на основе разработанного классификатора (рисунок 6.11). Альтернативные варианты выбранного оборудования и оснастки показаны на классификаторе с помощью графов.

С помощью классификатора, с использованием данных производителей и поставщиков оборудования [157, 185, 235] подобрано пять альтернативных вариантов оборудования и оснастки:

- вариант Т1 – изготовление соединения С3 на базе прессы для сращивания заготовок по длине;
- вариант Т2 – изготовление соединения С4 на базе установки для мелкосерийного производства и экспериментальных исследований;
- вариант Т3 – изготовление соединения С5 на базе установки для мелкосерийного производства и экспериментальных исследований;
- вариант Т4 – изготовление соединения С4 на базе винтового прессы для сплачивания заготовок по ширине;

- вариант Т5 – изготовление соединения С5 на базе винтового пресса для сплачивания заготовок по ширине.

2.1	2.1.1	2.1.2	2.1.3	2.1.4	2.1.5	2.1.6	2.1.7
Схема обработки	Позиционная	Проходная	Позиционно-проходная				
2.2	2.2.1	2.2.2	2.2.3	2.2.4	2.2.5	2.2.6	2.2.7
Тип пресса по направлению усилия прессования	Горизонтальный	Вертикальный					
2.3	2.3.1	2.3.2	2.3.3	2.3.4	2.3.5	2.3.6	2.3.7
Привод пресса	Пневматический	Гидравлический	Винтовой	Эксцентрик	Кривошипный	Ручной	Комбинированный
2.4	2.4.1	2.4.2	2.4.3	2.4.4	2.4.5	2.4.6	2.4.7
Усилие прессования	До 1,5 кН	Свыше 1,5 до 5 кН	Свыше 5 до 10 кН	Свыше 10 до 30 кН	Свыше 30 до 60 кН	Свыше 60 до 100 кН	Свыше 100 кН
2.5	2.5.1	2.5.2	2.5.3	2.5.4	2.5.5	2.5.6	2.5.7
Скорость прессования	До 30 мм/мин	Свыше 30 до 60 мм/мин	Свыше 60 до 120 мм/мин	Свыше 120 до 300 мм/мин	Свыше 300 до 600 мм/мин	Свыше 600 до 1200 мм/мин	Свыше 1200 мм/мин
2.6	2.6.1	2.6.2	2.6.3	2.6.4	2.6.5	2.6.6	2.6.7
Тип обжима заготовки	Без обжима	Двухсторонний	Четырехсторонний				
2.7	2.7.1	2.7.2	2.7.3	2.7.4	2.7.5	2.7.6	2.7.7
Конструкция обжима заготовки	Винтовой	Клиновой	Гидравлический	Пневматический	Комбинированный		
2.8	2.8.1	2.8.2	2.8.3	2.8.4	2.8.5	2.8.6	2.8.7
Конструкция устройства извлечения пуансона	Пружинная	Гидравлическая	Рычажная				

----- вариант Т1
 варианты Т2 и Т3
 _____ варианты Т4 и Т5

Рисунок 6.11 – Альтернативные варианты оборудования и оснастки, показанные на классификаторе

Вариант Т1 предусматривает использование прессы для сращивания заготовок по длине модели «ПСК-3000». Пресс горизонтальный, на пневмоприводе, работает по позиционно-проходной схеме. Скорость подачи заготовок (скорость прессования) по технической характеристике – 30 м/мин. Обжим заготовки – четырехсторонний, с помощью пневмозажимов. Для извлечения пуансона предлагается использование устройства пружинной конструкции.

Варианты Т2 и Т3 основаны на использовании установки для мелкосерийного производства и экспериментальных исследований (см. раздел 3) на основе вертикального прессы П-10 на гидроприводе. Схема обработки – позиционная. Скорость прессования – 80 мм/мин. Обжим заготовки – четырехсторонний, винтовой, с помощью прижимных планок. Извлечение пуансона за счет пружинного приспособления.

Варианты Т4 и Т5 основаны на применении винтового вертикального прессы модели «ПВС-1М». Пресс создает усилие сжатия одновременно в двух плоскостях (например, пакета брусков при склеивании мебельного щита). В производстве дверной филенки это позволит избежать необходимости использования дополнительного оборудования для сращивания по длине. Прессование осуществляется по позиционной схеме. Скорость прессования не превысит 30 мм/мин. Обжим заготовки – двухсторонний, за счет винтов.

6.1.3.2 Оценка эффективности альтернативных вариантов оборудования и оснастки.

Оценка эффективности производится с помощью показателя «Затраты на изготовление соединения $C_{исс}$ », рассчитываемого по формуле (9.1):

$$C = M + Z_o + Z_d + H_{ec} + Z_{экс} + Z_{о.ц.} + Z_{о.з.} + Z_{пр} + Z_k \cdot \quad (9.1)$$

где M – затраты на основные материалы (за вычетом стоимости реализуемых отходов), руб.;

Z_o – основная заработная плата производственных рабочих, руб.;

Z_d – дополнительная заработная плата производственных рабочих, руб.;

H_{ec} – единый социальный налог, руб.;

$Z_{экс}$ – расходы на содержание и эксплуатацию оборудования, руб.;

$Z_{о.ц.}$ – общецеховые расходы, руб.;

$Z_{о.з.}$ – общезаводские (общехозяйственные) расходы, руб.;

$Z_{пр}$ – прочие производственные расходы, руб.;

Z_k – коммерческие расходы, руб.

Для расчетов использовались данные предприятия ООО «Техноресурс», справочные данные [25] и модели для определения усилия прессования, полученные в разделе 4. Исходные данные и промежуточные результаты расчетов приведены в [228]. По результатам расчетов сравнительная себестоимость изготовления соединений составила: для варианта Т1 – 2,77 руб., для Т2 – 3,82 руб., для Т3 – 4,49 руб., для Т4 – 5,48 руб., для Т5 – 6,81 руб.

Таблица 6.3 – Исходные данные и результат расчета затрат на изготовление соединения

Обозначение альтернативных вариантов	Цена заготовки, руб.	Норма технологических потерь заготовок, N%	Время изготовления одного соединения, ч	Затраченная мощность, кВт	Расходы на приобретение инструмента, руб.	Затраты на обслуживание инструмента, руб.	Сравнительная себестоимость, руб.
Т1	12	4	0,008	34	5260	400	2,78
Т2	9	5	0,033	25	315	30	3,82
Т3	9	6	0,033	27	620	30	4,50
Т4	9	5	0,066	22	315	30	5,48
Т5	9	6	0,066	24	620	30	6,82

Оптимальным сочетанием комплексных показателей конкурентоспособности являются наименьшие затраты на изготовление соединения $C_{ис}$ при наивысшем уровне качества соединения $K_{ис}$. На рисунке 6.12 приведены гистограммы для сравнения этих показателей по пяти альтернативным вариантам Т1 – Т5.

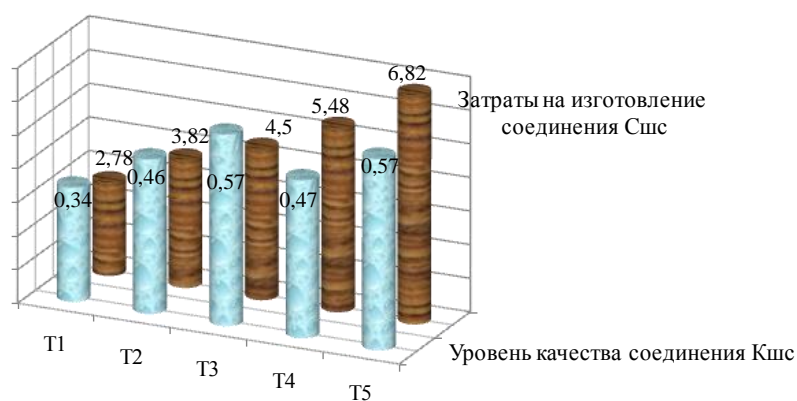


Рисунок 6.12 – Сравнение альтернативных вариантов технологических процессов изготовления соединений по комплексным показателям

Вариант T1 имеет наименьшее значение уровня качества соединения K_{usc} , варианты T4 и T5 – наибольшие значения затрат на изготовление C_{usc} , поэтому данные варианты отсеиваются. Оптимальным сочетанием показателей обладают варианты T2 и T3. Среди оставшихся вариантов вариант T2 обладает более низкой себестоимостью $C_{usc}=3,82$ руб. и более низким уровнем качества $K_{usc} = 0,46$. Вариант T3 – более высоким уровнем качества $K_{usc} = 0,57$, но большей себестоимостью $C_{usc} = 4,5$ руб.

Вариант T3 более эффективен для получения соединения более высокого качества и при отсутствии требований по максимальной производительности, то есть для индивидуального производства. Вариант T3 предусматривает прессование соединения C5 на прямоугольный шип, невидимый по пласти, видимый по кромке на базе установки для мелкосерийного производства и экспериментальных исследований.

Таким образом, для заданных условий, т.е. для мелкосерийного производства дверной филенки на предприятии ООО «Ресурс», наиболее эффективным является вариант T2 – прессование соединения C4 на прямоугольный шип, видимый по пласти, на прессе П-10 с оснасткой. Использование указанных технических предложений и рекомендаций позволило повысить качество соединений и снизить себестоимость их изготовления на 6,4 % за счет сокращения затрат на инструмент и снижения энергоемкости процесса формирования шипов вследствие отказа от использования системы аспирации.

6.2 Этапы технологического процесса изготовления деталей шиповых соединений способом торцового прессования

На основании результатов исследований определен состав и последовательность этапов технологического процесса, технологические требования и рекомендуемые режимы формирования соединений на основе технологии прессования шипов.

Первая группа технологических операций по продольному и поперечному раскрою сухих пиломатериалов с вырезкой дефектов проводится по типовым режимам и не отличается от подготовки заготовок, предназначенных для сращивания по длине.

Далее производятся технологические операции, приведенные в таблице 6.4. Здесь показаны этапы обработки заготовок, начиная с их сортировки и заканчивая сборкой соединения. Обработка проводится при влажности древесины, соответствующей эксплуатационной влажности изделий, при нормальной температуре и влажности производственного помещения.

Таблица 6.4 – Параметры режимов технологических операций формирования клеевых соединений на прессованные шипы

Основные этапы технологического процесса	Технологические требования и режимы
Сортировка и отбор заготовок	Наклон волокон не более 15 % для образцов из древесины сосны, не более 10 % – из березы и дуба.
	Отсутствие трещин и сучков в зоне прессования.
	Преимущественно тангенциально ориентированная плась.
	Влажность заготовок 6 – 12 %.
Обжим заготовки в оснастке	Двух- или четырехсторонний обжим заготовок.
	Направление усилия двухстороннего обжима – со стороны кромок заготовки.
	Усилие обжима 0,8 – 1 кН для образцов древесины сосны, 0,9 – 1,2 кН из березы и дуба.
Формирование шипов прессованием	Материал пуансона – СтЗсп.
	Точность инструмента – 11 квалитет.
	Скорость прессования 2 – 4 мм/с.

Основные этапы технологического процесса	Технологические требования и режимы
	Температура заготовки, инструмента и окружающей среды 18 – 25 °С.
	Величина усилия прессования – по формуле 4.7 с учетом количества шипов. (На примере заготовок из древесины сосны сечением 25х40 мм: 28 – 30 кН).
	Глубина проушины 9 – 11 мм.
	Ширина проушины 2 – 4 мм.
Нанесение клея	Рекомендуемые клеи – на основе ПВА-дисперсии.
	Двухстороннее нанесение
	Расход 95 – 140 г/м ² .
Сборка и запрессовка соединения	Натяг в соединении шип-проушина от 0,1 до 0,2 мм.
	Усилие запрессовки 8,8 – 11,7 кН.
	Время выдержки под давлением 10 – 20 с.
Время технологической выдержки после склеивания	В зависимости от типа используемого клея от 5 до 20 мин.

После сборки соединений заготовки подвергают механической обработке в соответствии с назначением, например, двух- или четырехстороннему фрезерованию и другим последующим операциям по типовым режимам изготовления клееных изделий.

Перспективами применения технологии являются изготовление закрытых (рисунок 6.13 *а*) и полузакрытых (рисунок 6.13 *б*) соединений по длине. Типовые угловые соединения на прямоугольные ящичные шипы (рисунок 6.13 *в*) также могут быть получены способом прессования.

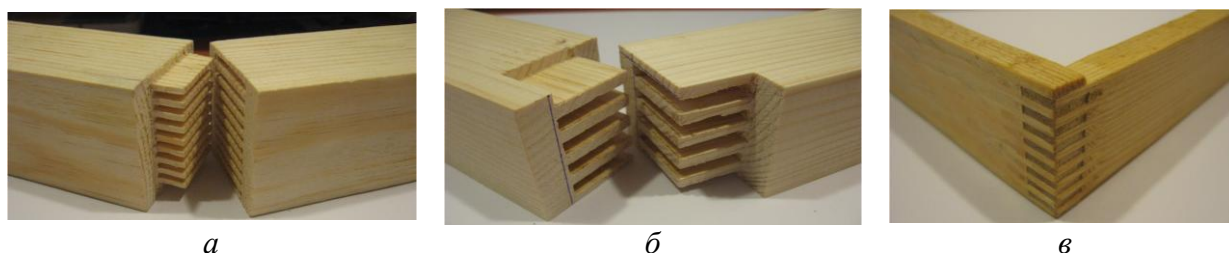


Рисунок 6.13 – Экспериментальные образцы соединений: *а* – на закрытые шипы; *б* – на полузакрытые шипы; *в* – на открытые прямоугольные шипы

6.3 Выводы

6.3.1 Разработана методика комплексной оценки эффективности шиповых соединений и технологии их изготовления в зависимости от назначения и требований к конечным изделиям, включающая алгоритм оценки и выбора, классификаторы соединений, оборудования и оснастки; систему показателей качества соединений и критерии эффективности оборудования и оснастки; схему оценки уровня качества соединений и модели для его определения.

6.3.2 Использование предложенных в работе рекомендаций, позволяет выбрать наиболее эффективные соединения и технологии их изготовления в заданных предприятием условиях, что позволяет уменьшить себестоимость изготовления шиповых соединений на 6,4 % за счет снижения энергоемкости процесса формирования шипов вследствие отказа от использования систем аспирации, сокращения затрат на инструмент, снижения сроков подготовки производства.

6.3.3 Комплексные исследования процесса формирования клеевых соединений на прессованные шипы позволили установить требования к реализации основных технологических этапов в производственных условиях, значения параметров режимов процесса и достигаемые значения показателей качества соединений.

6.3.4 Направлениями дальнейших исследований в области формирования шиповых соединений на основе способа торцового прессования являются изучение механизма пластического формообразования элементов шиповых соединений при внедрении пуансонов различных форм сечения; исследование качества полученных деталей; разработка технологических режимов и оснастки для изготовления полузакрытых и закрытых шиповых соединений.

ОСНОВНЫЕ ВЫВОДЫ И РЕКОМЕНДАЦИИ

1. При внедрении призматического пуансона в древесину происходит сдвиг и сжатие древесины вдоль волокон, формирование под проушиной «пробки» из пластически деформированной древесины, которую можно рассматривать как более плотное включение в структуру по типу сучка, незначительно влияющее на общие свойства основного объема древесины. Упругое восстановление «пробки» не превышает 6 %.

2. Использование нового способа местного торцового прессования обеспечивает формирование прямоугольных проушин высокого качества с шероховатостью поверхности не более 86 мкм, точностью не ниже 13 качества без разрушения прилегающих зон древесины при выполнении ряда условий: влажность древесины от 5 до 18 %; наклон волокон не более 15 % для образцов из древесины сосны и не более 10 % для образцов и древесины березы и дуба; наличие бокового обжима заготовок в процессе прессования с усилием от 300 до 1 кН для образцов из древесины сосны, от 400 до 1,2 кН для березы и дуба в зависимости от ширины формируемых проушин; глубина внедрения пуансона до двух с половиной ширин проушины ($h_n > 2,5 B$).

3. Теоретически обоснованы и экспериментально подтверждены требования к посадкам для нового типа соединений по длине – на прямоугольные шипы. Предпочтительными посадками для прямоугольных шипов малых толщин являются $H13/k13$ и $H13/zA13$, рекомендуемый допуск шага – по полю допуска $k14$ и $zA14$. Использование посадки с натягом обеспечивает существенное повышение (до 39 %) прочности соединений по сравнению с посадкой с зазором. Полученные результаты позволяют проектировать параметры рабочих частей пуансонов.

4. Теоретические и экспериментальные исследования позволили установить, что основными факторами, влияющими на процесс холодного статического прессования проушин в заготовках одной породы, являются размеры проушины и влажность древесины.

5. Определены рациональные значения входных параметров технологических режимов (влажности, глубины и ширины проушин), обеспечивающих высокое качество обработки при минимальных энергозатратах. Рекомендуемые значения влажности W находятся в пределах 7 – 9,5 %, глубины h_n прессуемых проушин до 9 – 11 мм, ширины проушин $B \leq 4$ мм.

6. Подтверждена стабильность протекания технологического процесса местного торцового прессования, что позволяет варьировать параметры соединения (длину шипа, величину натяга) с целью получения заданных характеристик шипового соединения без значительного возрастания усилия прессования.

7. Соединения на прессованные прямоугольные шипы имеют высокое качество, в том числе хорошие эстетические показатели и относительную прочность, достигающую 80 %, удовлетворяющую требованиям стандартов, поэтому могут быть рекомендованы для изготовления клееных деревянных конструкций, столярно-строительных и других изделий.

8. Разработанная методика комплексной оценки эффективности шиповых соединений и технологии их изготовления, включающая алгоритм оценки и выбора, классификаторы соединений, оборудования и оснастки; систему показателей качества соединений и критерии эффективности оборудования и оснастки; схему оценки уровня качества соединений и модели для его определения, позволяет осуществлять обоснованный выбор наиболее эффективной технологии сращивания в зависимости от назначения соединения и требований к конечным изделиям.

9. Использование предложенных в работе рекомендаций, позволяет выбрать достичь снижения себестоимости изготовления шиповых соединений на 6,4 % за счет снижения энергоемкости процесса формирования шипов вследствие отказа от использования систем аспирации, сокращения затрат на инструмент, снижения сроков подготовки производства.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Авторское свидетельство № 1380946 СССР, МКИЗ 4 В27F 1/00. Способ изготовления рамок из деревянных брусков : № 3993608/29-15 : заявлено 19.12.1985 : опубликовано 15.03.88 / Астахов С. Б., Русинов В.И., Каменкович П.А., Молодкина В.П. 3 с.
2. Азгальдов, Г.Г. Теория и практика оценки качества товаров (основы квалиметрии) / Г.Г. Азгальдов. – Москва : Экономика, 1982. – 256 с.
3. Александров, А.П. Явление хрупкого разрыва // А.П. Александров, С.Н. Журков. – Ленинград : Москва: Государственное технико-теоретическое издательство, 1933. – 52 с.
4. Анализ кривой напряжений в древесине при тиснении / М. Гафф, М. Гашпарик, М. Квиеткова [и др.] // Деревообрабатывающая промышленность. – 2015. – № 1. – С. 24–31.
5. Андреев, В.Н. Принятие оптимальных решений: теория и применение в лесном комплексе / В.Н. Андреев, Ю.Ю. Герасимов. – Йоэнсуу : Изд-во ун-та Йоэнсуу, 1999. – 200 с.
6. Анискин, Ю.П. Новая техника: повышение эффективности создания и освоения / Ю.П. Анискин, Н.К. Моисеева, А.В. Проскуряков. – Москва : Машиностроение, 1984. – 192 с.
7. Ашкенази, Е.К. Анизотропия древесины и древесных материалов / Е.К. Ашкенази. – Москва: Лесная промышленность, 1978. – 224 с.
8. Аюков, С. Прочность сращивания на прямые ящичные шипы // Сергей Аюков : [сайт]. – 2008. – URL: <http://www.ayukov.com/woodworking/tips/box-joint-strength.html> (дата обращения: 25.12.18).
9. Барташевич, А.А. Конструирование мебели: учебник / А.А. Барташевич, С.П. Трофимов. – Минск : Современная школа, 2006. – 336 с.
10. Бартенев, Г.М. Прочность и разрушение высокоэластичных материалов / Г.М. Бартенев, Ю.С. Зуев. – Москва–Ленинград : Химия, 1964. – 388 с.

11. Белянкин, Ф.П. Деформативность и сопротивляемость древесины как упруго-вязкопластического тела / Ф.П. Белянкин, В.Ф. Яценко. – Киев: Издательство АН УССР, 1957. – 198 с.
12. Бильтриков, В.Н. Экспериментальное исследование напряженного и деформированного состояний в зоне концентрации напряжений при упругих, малых и средних пластических деформациях: автореферат диссертации на соискание степени кандидата технических наук / В.Н. Бильтриков; Московский лесотехнический институт. – Москва, 1966. – 22 с.
13. Блауберг, И.В. Становление и сущность системного подхода / И.В. Блауберг, Э.Г. Юдин – Москва : Наука, 1973. – 270 с.
14. Блюмберг, В.А. Какое решение лучше? Метод расстановки приоритетов / В.А. Блюмберг, В.Ф. Глушко. – Ленинград : Лениздат, 1982. – 160 с.
15. Болотин, В.В. Статистические методы в строительной механике / В.В. Болотин. – Москва: Стройиздат, 1968. – 279 с.
16. Боровиков, А.М. Справочник по древесине / А.М. Боровиков, Б.Н. Уголев. – Москва: Лесная промышленность, 1989. – 246 с.
17. Боровиков, В.П. STATISTICA. Искусство анализа данных на компьютере : Для профессионалов / В.П. Боровиков. – 2-е изд. (+CD). – Санкт-Петербург : Питер, 2003. – 700 с.
18. Боровиков, В.П. Популярное введение в современный анализ данных в системе STATISTICA / В.П. Боровиков. – Москва : Горячая линия – Телеком, 2016. – 288 с.
19. Боровиков, В.П. Популярное введение в современный анализ данных и машинное обучение на STATISTICA // В.П. Боровиков. – Москва : Горячая линия – Телеком, 2018. – 354 с.
20. Бочкарев, В.В. Ползучесть естественной и прессованной древесины при кручении: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / В.В. Бочкарев; Московский лесотехнический институт. – Москва, 1968. – 148 с.

21. Бриль, А.Р. Функционально-стоимостной анализ в экономических расчетах / А.Р. Бриль. – Ленинград : Изд-во ЛГУ, 1989. – 148 с.
22. Буглай, Б.М. Технология изделий из древесины : учебник / Б.М. Буглай, Н.А. Гончаров. – Москва : Лесная промышленность, 1985. – 408 с.
23. Быковский, В.И. Применение механики упруго-вязких тел к построению теории сопротивления древесины с учетом фактора времени // Исследования прочности и деформативности древесины. – Москва, Издательство литературы по строительству и архитектуре, 1956. – С. 32–41.
24. Быковский, В.Н. Теория сопротивления элементов деревянных конструкций с учетом главнейших физико-механических факторов (характера нагружения, структуры и неоднородности материала при сжатии и растяжении вдоль волокон и изгибе): диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / В.Н. Быковский; Московский лесотехнический институт. – Москва, 1953. – 314 с.
25. Важенина, К. Качественное сращивание древесины - залог коммерческого успеха / К. Важенина // Лесной эксперт: [сайт]. – 2002. – URL: <http://www.lesnoyexpert.ru/index.php?p=article&id=view&n=13&a=11> (дата обращения: 01.08.2009).
26. Ванин, С.И. Древесиноведение / С.И. Ванин, Б.Н. Уголев. – Москва - Ленинград: Гослесбумиздат, 1949. – 581 с.
27. Варжапетян, А.Г. Квалиметрия: учебное пособие / А.Г. Варжапетян. – Санкт-Петербург : ГУАП, 2005. –176 с.
28. Вейбулл, В. Усталостные испытания и анализ их результатов / В. Вейбулл; перевод с английского Т. А. Бекш и Е. С. Муслина ; под редакцией С. В. Серенсена. – Москва : Машиностроение, 1964. – 275 с.
29. Вентцель, Е. С. Исследование операций: задачи, принципы, методология / Е.С. Вентцель. – 2-е изд. – Москва : Наука, 1988. – 208 с.
30. Вихров, В.Е. Диагностические признаки древесины / В.Е. Вихров. – Москва: АН СССР, 1959. – 132 с.

31. Волкова, В.Н. Основы теории систем и системного анализа: учебник / В.Н. Волкова, А.А. Денисов. – Санкт-Петербург: Изд-во СПбГТУ, 2001. – 512с.
32. Волинский, В.Н. Технология клееных материалов: учебно-справочное пособие / В.Н Волинский. – Санкт-Петербург : ПРОФИКС, 2008. – 392 с.
33. Глебов, И.Т. Методы поиска технических решений в учебном проектировании: учебное пособие / И.Т. Глебов. – Екатеринбург: УГЛТА, 1998. – 135 с.
34. Глухих, В.Н. Повышение качества сушки пиломатериалов на основе учета анизотропии древесины при составлении схем раскроя бревен: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / В.Н. Глухих; Санкт-Петербургская государственная лесотехническая академия им. С.М. Кирова. – Санкт-Петербург, 2008. – 291 с.
35. Гончаров, Н. А. Технология изделий из древесины: учебник / Н.А. Гончаров, В.Ю. Башинский, Б.М. Буглай. – Москва : Лесная промышленность, 1990. – 525 с.
36. Гордашникова, О.Ю. Функционально-стоимостной анализ качества продукции и управления маркетингом на предприятии / О.Ю. Гордашникова. – Москва : Издательство «Альфа-Пресс», 2006. – 88 с.
37. Гороховский, А.Г. Оптимизация режимов сушки пиломатериалов / А.Г. Гороховский, Е.Е. Шишкина, А.А. Гороховский // Вестник МарГТУ. – 2011. – № 1. – С. 52–58.
38. Гороховский, А.Г. Технология сушки пиломатериалов на основе моделирования и оптимизации процессов тепломассопереноса в древесине: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / А.Г. Гороховский ; Санкт-Петербургская государственная Лесотехническая академия им. С. М. Кирова. – Санкт-Петербург, 2008. – 263 с.
39. ГОСТ 11047-90. Детали и изделия деревянные для малоэтажных жилых и общественных зданий. Технические условия. // Деревянные детали

и изделия из древесины для строительства. Часть 2 : сборник. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 2002. – С. 13–20.

40. ГОСТ 15467-79. Управление качеством продукции. Основные понятия. Термины и определения. – Москва : Стандартиформ, 2009. – 22 с.

41. ГОСТ 15612-2013. Изделия из древесины и древесных материалов. Методы определения параметров шероховатости поверхности. – Москва : Стандартиформ, 2014. – 11 с.

42. ГОСТ 15612-85. Изделия из древесины и древесных материалов. Методы определения параметров шероховатости поверхности. – Москва : Стандартиформ, 2009. – 11 с.

43. ГОСТ 15613.1-84. Древесина клееная массивная. Методы определения предела прочности клеевого соединения при скалывании вдоль волокон. – Москва : Издательство стандартов, 1984. – 6 с.

44. ГОСТ 15613.4-78. Древесина клееная массивная. Методы определения предела прочности зубчатых клеевых соединений при статическом изгибе. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 1999. – 5 с.

45. ГОСТ 15613.5-79. Древесина клееная массивная. Метод определения предела прочности зубчатых клеевых соединений при растяжении. – Москва: ИПК Издательство стандартов, 1999. – 7 с.

46. ГОСТ 16483.0-89. Древесина. Общие требования к физико-механическим испытаниям. – Москва: Издательство стандартов, 1989. – 13 с.

47. ГОСТ 16483.10-73. Древесина. Методы определения предела прочности при сжатии вдоль волокон. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 1999. – 6 с.

48. ГОСТ 16483.17-81. Древесина. Метод определения статической твердости. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 1999. – 5 с.

49. ГОСТ 16483.23-73. Древесина. Метод определения предела прочности при растяжении вдоль волокон. – Москва: Издательство стандартов, 1999. – 4 с.

50. ГОСТ 16483.3-84. Древесина. Метод определения предела прочности при статическом изгибе. – Москва: Издательство стандартов, 1999. – 7 с.
51. ГОСТ 16588-91. Пилопродукция и деревянные детали. Методы определения влажности. – Москва : Стандартиформ, 2009. – 6 с.
52. ГОСТ 16675-80. Пуансоны, матрицы, державки, подкладные плитки и шпонки штампов для разделительных операций. Технические условия. Москва : ИПК Издательство стандартов, 1999. – 5 с.
53. ГОСТ 19414-90. Древесина клееная массивная. Общие требования к зубчатым клеевым соединениям. – Москва : Издательство стандартов, 1990. – 7 с.
54. ГОСТ 20850-2014. Конструкции деревянные клееные несущие. Общие технические условия. – Москва : Стандартиформ, 2019. – 15 с.
55. ГОСТ 20850-84. Конструкции деревянные клееные. Общие технические условия. – Москва : Издательство стандартов, 1985. – 45 с.
56. ГОСТ 23166-99. Блоки оконные. Общие технические условия. – Москва : Госстрой России, ГУП ЦПП, 2000. – 45 с.
57. ГОСТ 24700-99. Блоки оконные деревянные со стеклопакетами. Технические условия. – Москва : Госстрой России, ГУП ЦПП, 2000. – 55 с.
58. ГОСТ 25346-2013 (ISO 286-1:2010). Основные нормы взаимозаменяемости. Характеристики изделий геометрические. Система допусков на линейные размеры. Основные положения, допуски, отклонения и посадки. – Москва : Стандартиформ, 2014. – 38 с.
59. ГОСТ 30972-2002. Заготовки и детали деревянные клееные для оконных и дверных блоков. Технические условия. – Москва : Госстрой России, ГУП ЦПП, 2003. – 30 с.
60. ГОСТ 30974-2002. Соединения угловые деревянных брусчатых и бревенчатых малоэтажных зданий. Классификация, конструкции, размеры. – Москва : Госстрой России, ГУП ЦПП, 2003. – 30 с.

61. ГОСТ 33080-2014. Конструкции деревянные. Классы прочности конструкционных пиломатериалов и методы их определения. – Москва : Стандартиформ, 2015. – 14 с.
62. ГОСТ 33081-2014. Конструкции деревянные клееные несущие. Классы прочности элементов конструкций и методы их определения. – Москва : Стандартиформ, 2015. – 10 с.
63. ГОСТ 33120-2014. Конструкции деревянные клееные. Методы определения прочности клеевых соединений. – Москва : Стандартиформ, 2009. – 18 с.
64. ГОСТ 4.208-79. Система показателей качества продукции. Строительство. Конструкции деревянные клееные. Номенклатура показателей. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 2003. – 5 с.
65. ГОСТ 4.223-83 Система показателей качества продукции. Строительство. Изделия паркетные. Номенклатура показателей. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 2003. – 7 с.
66. ГОСТ 4.226-83. Система показателей качества продукции. Строительство. Окна, двери и ворота деревянные. Номенклатура показателей. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 2003. – 9 с.
67. ГОСТ 475-2016. Блоки дверные деревянные и комбинированные. Общие технические условия. – Москва : Стандартиформ, 2017. – 33 с.
68. ГОСТ 475-78. Двери деревянные. Общие технические условия. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 2003. – 13 с.
69. ГОСТ 6449.1-82. Изделия из древесины и древесных материалов. Поля допусков для линейных размеров и посадки // Изделия из древесины и древесных материалов. Допуски и посадки : сборник. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 2002. – С. 163–173.
70. ГОСТ 6449.4-82. Изделия из древесины и древесных материалов. Допуски расположения осей отверстий для крепежных деталей // Изделия из древесины и древесных материалов. Допуски и посадки : сборник. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 2002. – С. 193–203.

71. ГОСТ 7016-2013. Изделия из древесины и древесных материалов. Параметры шероховатости поверхности. – Москва : Стандартинформ, 2014. – 11 с.
72. ГОСТ 9013-59 (ИСО 6508-86). Металлы. Метод измерения твердости по Роквеллу. – Москва : ИПК Издательство стандартов, 2001. – 7 с.
73. ГОСТ 9330-2016. Основные соединения деталей из древесины и древесных материалов. Типы и размеры. – Москва : Стандартинформ, 2017. – 16 с.
74. ГОСТ 9629-81. Заготовки из модифицированной древесины. Технические условия. – Москва : Издательство стандартов, 1981. – 13 с.
75. ГОСТ 9685-61. Заготовки из древесины хвойных пород. Технические условия. – Москва : Издательство стандартов, 1994. – 12 с.
76. ГОСТ Р 53791-2010. Ресурсосбережение. Стадии жизненного цикла изделий производственно-технического назначения. Общие положения. – Москва : Стандартинформ, 2018. – 8 с.
77. ГОСТ Р 58459-2019. Конструкции деревянные. Определение нормативных и расчетных значений механических свойств древесины и материалов на ее основе. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 8 с.
78. ГОСТ Р 8.736-2011. Государственная система обеспечения единства измерений. Измерения прямые многократные. Методы обработки результатов измерений. Основные положения. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 19 с.
79. Демидов, Н.Н. Моделирование процесса прессования проушины в заготовках из древесины сосны / Н.Н. Демидов, О.А. Рублева // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России : материалы XVI Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов. – Екатеринбург : УГЛТУ, 2020. – С. 16–19.
80. Денисенко, В.В. Типоразмеры заготовок втулок из древесины и новые устройства для их формообразования / В.В. Денисенко // Вопросы тео-

рии, технологии и применения уплотненной древесины: научные труды. – 1968. – № 111. – С. 69–75.

81. Деньгин, А.В. Обзор и анализ конструкций и способов изготовления деревянных игрушек / А.В. Деньгин, О.А. Рублева // Общество. Наука. Инновации (НПК-2017) : сборник статей всероссийской ежегодной научно-практической конференции. – Киров : ВятГУ, 2017. – С. 992–997.

82. Деньгин, А.В. Способ оценки уровня качества клееной балки / А.В. Деньгин, О.А. Рублева // Общество, наука, инновации (НПК-2015) : сборник материалов всероссийской ежегодной научно-практической конференции. – Киров : ВятГУ, 2015. – С. 743–747.

83. Деньгин, А.В. Способы получения рельефа на поверхности деревянных заготовок / А.В. Деньгин, О.А. Рублева // Общество, наука, инновации (НПК-2016) : сборник статей всероссийской ежегодной научно-практической конференции. – Киров : ВятГУ, 2016. – С. 1310–1316.

84. Дитрих, Я. Проектирование и конструирование: Системный подход / Я. Дитрих ; перевод с польского. – Москва : Мир, 1981. – 456 с.

85. Дмитриев, П.А. Исследование прочности древесины на смятие в отверстиях при кратковременном и длительном действии нагрузки / П.А. Дмитриев // Известия вузов. Строительство и архитектура. – 1965. – №. 12. – С. 165-173.

86. Дорняк, О.Р. Математическое моделирование процесса прессования древесины / О.Р. Дорняк // Политематический сетевой электронный научный журнал Кубанского государственного аграрного университета. – 2012. – № 75. – С. 177–191.

87. Дорняк, О.Р. Моделирование реологического поведения древесины в процессах прессования / О.Р. Дорняк // Инженерно-физический журнал. – 2003. – Т. 76. – № 3. – С. 150–155.

88. Дорняк, О.Р. Реология в процессах прессования древесины / О.Р. Дорняк. – Воронеж: ВГЛТА, 2005. – 171 с.

89. Дорняк, О.Р. Структурно-механические свойства и напряженно-деформированное состояние древесины в процессах прессования. Прогнозирование параметров структуры и прочности / О.Р. Дорняк, Л.Т. Свиридов // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. – 2006. – № 1. – С. 58–63.

90. Дорняк, О.Р. Структурно-механические свойства и напряженно-деформированное состояние древесины в процессах прессования. Реологическое уравнение состояния древесины / О.Р. Дорняк, Л.Т. Свиридов // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. – 2006. – № 1. – С. 50–57.

91. Дубов, Ю. А. Многокритериальные модели формирования и выбора вариантов систем / Ю. А. Дубов, С. И. Травкин, В. Н. Якимец. – Москва : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1986. – 296 с.

92. Еленева, Ю.А. Экономика машиностроительного производства : учебник / Ю.А. Еленева. – Москва : Издательский центр «Академия», 2006. – 256 с.

93. Жаданов, В.И. Исследование напряженно-деформированного состояния древесины при ее смятии в отверстиях крестообразными витыми нагелями / В.И. Жаданов, М.А. Аркаев, В.Е. Афанасьев // Обследование зданий и сооружений: проблемы и пути их решения: материалы VII Международной научно-практической конференции. – Санкт-Петербург : Издательство Политехнического университета, 2017. – С. 120–132.

94. Жариков, О.Н. Системный подход к управлению: учебное пособие / О.Н. Жариков, В.И. Королевская, С.Н. Хохлов. – Москва : ЮНИТИ-ДАНА, 2001. – 62 с.

95. Житков, П.Н. Сопротивление прессованной древесины: автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / П.Н. Житков ; Московский государственный лесотехнический институт. – Москва, 1961. – 22 с.

96. Жуков, В.П. Технология склеивания древесины / В.П. Жуков. – Воронеж: ВГЛТИ, 1981. – 79 с.
97. Загородников, С.В. Экономика отрасли (машиностроение) / С.В. Загородников, М.Г. Миронов. – Москва : Форум: Инфра-М. – 2008. – 320 с.
98. Иванов, Ю.М. Изменение микроскопического разрушения древесины в процессе её деформирования и разрушения / Ю.М. Иванов // Труды Института леса АН СССР. – 1953. – Т. IX. – С. 89–114.
99. Иванов, Ю.М. Исследования физических свойств древесины / Ю.М. Иванов, В.А. Баженов. – Москва: АН СССР, 1959. – 54 с.
100. Иванов, Ю.М. О деформациях и напряжениях в древесине как неоднородном материале / Ю.М. Иванов // Труды Института леса АН СССР, 1949. – Т. 4. – С. 195–200.
101. Ивановский, Е.Г. Резание древесины / Е.Г. Ивановский. – Москва: Лесная промышленность, 1974. – 200 с.
102. Ивликов, Н.В. Анализ факторов, влияющих на усилие прессования древесины / Н.В. Ивликов, О.А. Рублева // Общество, наука, инновации (НПК-2016) : сборник статей всероссийской ежегодной научно-практической конференции. – Киров : ВятГУ, 2016. – С. 1304–1309.
103. Изготовление деталей из прессованной древесины: технические условия / Под общей редакцией П.Н. Хухрянского и П.Н. Житкова. – Воронеж : Книжное издательство, 1957. – 60 с.
104. Изменение микроструктуры древесины при торцовом прессовании / Л.Б. Лихачева, Н.Е. Косиченко, В.А. Шамаев, С.В. Щетинкин // Деревообрабатывающая промышленность. – 2001. – № 5. – С. 21–24.
105. Ильинский, С.А. Допуски и технические измерения в деревообработке / С.А. Ильинский, В.М. Воеводин, Н.И. Фомочкин. / Москва : Лесная промышленность, 1978. – 296 с.
106. Интеллектуальный Портал Знаний statistica.ru : сайт / StatSoft Russia. – Москва, 2020. – URL: <http://statistica.ru> (дата обращения: 04.07.2020).

107. Исследование клеевых соединений древесины / А.А. Тамби, А.Н. Чубинский, К.В. Чаузов, А.М. Кульков // Лесной вестник. – 2016. – Т. 20. – № 2. – С.120–126.

108. Калачев, Г.П. Исследование процесса и разработка технологии пропитки древесины с использованием импульсных колебаний: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Г.П. Калачев ; Московский государственный лесотехнический институт. – Москва, 1980. – 180 с.

109. Калниньш, А.И. Новый способ производства пластифицированной древесины / А.И. Калниньш, Т.А. Дарзиньш, Г. Б. Берзиньш // Химическая переработка и защита древесины. – Рига: Издательство АНЛСССР, 1964. – С. 5–11.

110. Катулев, А.Н. Математические методы в системах поддержки принятия решений / А. Н. Катулев, Н. А. Северцев. – Москва : Высшая Школа, 2005. – 311 с.

111. Качество, эффективность и потребительская оценка системы технических изделий / Б.И. Герасимов, А.Л. Денисова, О.Г. Берстенева [и др.]. – Тамбов: Изд-во ТГТУ, 2002. – 112 с.

112. Кириллов, К.И. Сопротивление спрессованной древесины знакопеременным и ударным нагрузкам: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / К.И. Кириллов. – Воронеж, 1953. – 198 с.

113. Клеевые соединения древесины и бетона в строительстве / Л.И. Шутенко, В.З. Клименко, Ю.Д. Кузнецов [и др.]. – Киев : Будивэльныйк, 1990. – 136 с.

114. Ковалев, Н.Н. Исследование деформирования древесины при сжатии / Н.Н. Ковалев // Механическая технология древесины : сборник научных трудов Белорусского технологического института им. С.М. Кирова. – Минск : БТИ, 1983. – Вып. 13. – С. 86–89.

115. Ковальчук, Л.М. Заводской контроль прочности клеевых соединений деревянных конструкций и его эффективность / Л.М. Ковальчук, Т. Диева, С. Паук // Строительные материалы. – 2004 . – № 5. – С. 8–9.

116. Ковальчук, Л.М. Производство деревянных клееных конструкций: 3-е изд., перераб. и доп. / Л.М. Ковальчук. – Москва : РИФ «Стройматериалы», 2005. – 335 с.

117. Косарев, А.Б. Исследование структуры прессованной древесины // А.Б. Косарев, О.А. Рублева // Общество, наука, инновации (НПК-2014) : сборник материалов всероссийской ежегодной научно-практической конференции. – Киров : ВятГУ, 2014. – С. 1375–1377.

118. Крейндли, Л.Н. Столярные, плотничные и паркетные работы: практическое пособие / Л.Н. Крейндли. – Москва : Высшая школа, 1989. – 352 с.

119. Кузнецов, Г.П. Изменение макроструктуры древесины при торцовом местном прессовании прямоугольной проушины / Г.П. Кузнецов, О.А. Рублева // Наука – производство – технологии – экология : сборник материалов всероссийской научно-технической конференции. – Киров : ВятГУ, 2004. – Т. 5. – С. 70–71.

120. Кузнецов, Г.П. Исследование процесса внедрения инденторов в древесину / Г.П. Кузнецов, С.А. Утробин // Наука – производство – технология – экология (Наука–ПРОТЭК–98) : сборник материалов региональной научно-технической конференции ВятГТУ. – Киров : ВятГТУ, 1998. – Т. 1. – С. 203–204.

121. Кузнецов, Г.П. Модель для расчета усилия прессования прямоугольной проушины в деревянной заготовке / Г.П. Кузнецов, О.А. Рублева // Наука – производство – технологии – экология : сборник материалов всероссийской научно-технической конференции. – Киров : ВятГУ, 2002. – Т. 3. – С. 59–60.

122. Кузнецов, Г.П. Основные методические положения моделирования при проектировании технологических процессов формирования рельефов на древесине / Г.П. Кузнецов, С.А. Утробин // Наука – производство – технология – экология : сборник материалов всероссийской ежегодной научно-технической конференции ВятГУ. – Киров : ВятГУ, 2001. – Т. 3. – С. 155–156.

123. Кузнецов, Г.П. Система критериев для оценки конкурентоспособности соединений древесины по длине, полученных методом прессования / Г.П. Кузнецов, О.А. Рублева // Наука – производство – технологии – экология : сборник материалов всероссийской научно-технической конференции. – Киров : ВятГУ, 2002. – Т. 3. – С. 57–58.

124. Кузнецов, Г.П. Система критериев для оценки показателей качества деталей при формировании рельефов на поверхности древесных заготовок / Г.П. Кузнецов, С.А. Утробин // Наука – производство – технология – экология : сборник материалов ежегодной региональной научно-технической конференции ВятГТУ. – Киров: ВятГТУ, 2000. – Т. 3. – С. 87–88.

125. Кузнецов, Г.П. Системный подход к проектированию шиповых соединений деревянных деталей и технологических процессов их изготовления / Г.П. Кузнецов, О.А. Рублева // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. – 2010. – № 4. – С. 155–159.

126. Кузнецов, Г.П. Экспериментальная проверка модели для расчета усилия прессования древесины / Г.П. Кузнецов, О.А. Рублева // Наука – производство – технологии – экология : сборник материалов всероссийской научно-технической конференции. – Киров : ВятГУ, 2003. – Т. 5. – С. 78–79.

127. Куликов, И.В. Исследование влияния влажностных условий на размер деталей из древесины / И.В. Куликов. – Москва: Оборонгиз, 1949.

128. Куликов, И.В. Основы взаимозаменяемости в деревообработке / И.В. Куликов. Москва ; Ленинград : Гослесбумиздат, 1955. – 288 с.

129. Куликов, И.В. Основы взаимозаменяемости и технические измерения в деревообработке / И. В. Куликов. – Москва : Лесная промышленность, 1966. – 376 с.

130. Курицын, В. Н. Экспериментальное уточнение реологической модели древесины / В.Н. Курицын, Е.М. Тюленева // Известия высших учебных заведений. Лесной журнал. – 2009. – № 5. – С. 104–109.

131. Лапшин, Ю.Г. Деформативность и прочность древесины и древесно-стружечных плит в технологических процессах : диссертация на соис-

кание ученой степени доктора технических наук / Ю.Г. Лапшин. – Москва, 1981. – 326 с.

132. Левинский, Ю.Б. Производство клееных слоистых материалов: учебное пособие / Ю.Б. Левинский. – Екатеринбург : УЛТИ, 1993. – 144 с.

133. Левинский, Ю.Б. Технология строительных материалов и конструкций на основе древесины: учебное пособие / Ю.Б. Левинский. – Екатеринбург : УГЛТУ, 2005. – 118 с.

134. Левинский, Ю.Б. Улучшение эксплуатационно-качественных характеристик клееных конструкций и материалов на основе древесины / Ю.Б. Левинский // Современные деревянные конструкции. Теория. Практика. Эксперимент : материалы научно-практической конференции. – Санкт-Петербург : Издательство СПбГАСУ, 2010. – С. 33–36.

135. Леоненков, А. В. Решение задач оптимизации в среде MS Excel / А. В. Леоненков. – Санкт-Петербург : БХВ-Петербург, 2005. – 704 с.

136. Леонтьев, Н.Л. Техника испытаний древесины. / Н.Л. Леонтьев. – Москва: Лесная промышленность, 1970. – 160 с.

137. Лихачева, Л.Б. Прессование древесины вдоль волокон при изготовлении торцового щитового паркета: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Л.Б. Лихачева ; Воронежская государственная лесотехническая академия. – Воронеж, 2001. – 158 с.

138. Лучинина, Е.К. Моделирование процесса торцового прессования древесины в программе Solid Edge / Е.К. Лучинина, О.А. Рублева // Общество. Наука. Инновации (НПК-2018) : сборник статей XVIII Всероссийской научно-практической конференции. – Киров : ВятГУ, 2018. – Т. 2. – С. 537–541.

139. Любченко, В.И. Резание древесины и древесных материалов: учебник / В.И. Любченко. – Москва : МГУЛ, 2004. – 310 с.

140. Мазуркин, П.М. Статистическое моделирование процессов деревообработки / П.М. Мазуркин, Р.Г. Сафин, Д.Б. Просвирников. – Казань: КНИТУ, 2014. – 342 с.

141. Марочник стали и сплавов : [сайт]. – URL: <http://www.splav-kharkov.com/main.php> (дата обращения: 06.02.2020).
142. Матвеев, Ю.Н. Основы теории систем и системного анализа : учебно-методическое пособие // Ю.Н. Матвеев. – Тверь: ТГТУ, 2007. – 100 с.
143. Митинский, А.Н. Упругая анизотропия древесины: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / А.Н. Митинский; Ленинградская лесотехническая академия. – Ленинград, 1946. – 326 с.
144. Митинский, А.Н. Упругие постоянные древесины как ортотропного материала / А.Н. Митинский // Труды ЛТА. – 1958. – № 63. – С. 22–54.
145. Мишин, В.М. Управление качеством: учебник // В.М. Мишин. – Москва : ЮНИТИ-ДАНА, 2012. – 463 с.
146. Мишков, С.Н. Технология изделий из древесины. Размерный анализ конструкции изделия: учебное пособие / С.Н. Мишков. – Москва: ГОУ ВПО МГУЛ, 2004. – 140 с.
147. Мовнин, М.С. Вопросы теории, технологии и применения уплотненной древесины / М.С. Мовнин, А.И. Калниньш, Г.В. Бериньш // Некоторые вопросы прокатки древесины: научные труды. – 1968. – № 111. – С. 9–21.
148. Моисеев, Н.Н. Математические задачи системного анализа / Н.Н. Моисеев. – Москва : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1981. – 488 с.
149. Моисеев, Н.Н. Неформальные процедуры и автоматизация проектирования / Н.Н. Моисеев. – Москва : Знание, 1979. – 64 с.
150. Моисеева, Н.К. Выбор технических решений при создании новых изделий / Н.К. Моисеева. – Москва : Машиностроение, 1980. – 181 с.
151. Моисеева, Н.К. Основы теории и практики функционально-стоимостного анализа: учебное пособие / Н.К. Моисеева, М.Г. Карпунин. – Москва : Высшая школа, 1988. – 192 с.
152. Моисеева, Н.К. Функционально-стоимостной анализ в машиностроении / Н.К. Моисеева. – Москва : Машиностроение, 1987. – 320 с.

153. Москалева, В.Е. Строение древесины и его изменение при физических и механических воздействиях / В.Е. Москалева. – Москва : АН СССР, 1957. – 165 с.
154. Найчук, А.Я. Прочность элементов деревянных конструкций в условиях сложного неоднородного напряженного состояния: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / А.Я. Найчук; ОАО «ЦНИИИПромзданий». – Москва, 2006. – 378 с.
155. Ногин, В.Д. Принятие решений при многих критериях / В.Д. Ногин. – Санкт-Петербург : Ютас, 2007. – 104 с.
156. Оборудование для клеильно-сборочных работ / В.А. Прохоров, Т.Г. Эпштейн, Л.И. Купцова, В.Е. Захаров. – Москва: Лесная промышленность, 1966. – 256 с.
157. Оборудование для сращивания по длине // КАМИ-Станкоагрегат : [сайт]. – Москва, 1991. – URL: http://stankoagregat.ru/wood/cat_61/ (дата обращения: 01.08.2009).
158. Огарков, Б.И. Теория и физическая сущность прессования древесины / Б.И. Огарков, А.В. Апостол. – Воронеж : ВГУ, 1981. – 84 с.
159. Озолиня, И.О. Ацетилирование древесины и биологическая проверка ацетилированных образцов / И.О. Озолиня, К.П. Швалбе, Я.Я. Витольныш // Известия АН Латвийской ССР. – 1966. – № 9. – С. 56–62.
160. Определение оптимальных параметров процесса прессования и обезвоживания пропитанных древесных материалов / О.А. Куницкая, В.Я. Шапиро, С.С. Бурмистрова, И.В. Григорьев // Лесной вестник. – 2012. – № 4 (87). – С. 110–115.
161. Оптнер, И.В. Системный анализ для решения деловых и промышленных проблем / И.В. Оптнер. – Москва : Советское радио, 1969. – 216 с.
162. Орлов, А.И. Теория принятия решений / А.И. Орлов. – Москва : Экзамен, 2005. – 656 с.
163. Орлова, Ю.Д. Отделка изделий из древесины / Ю.Д. Орлова. – Москва : Высшая школа, 1968. – 275 с.

164. Основы государственной политики в области экологического развития России на период до 2030 года (утв. Президентом РФ от 30 апреля 2012 г.) // Гарант. Ру: информационно-правовой портал. – URL: <https://base.garant.ru/70169264/> (дата обращения: 01.10.2020).

165. Основы научных исследований: учебник / В.И. Крутов, И.М. Грушко, В.В. Попов [и др.]; под редакцией В.И. Крутова, В.В. Попова. – Москва : Высшая школа, 1989. – 400 с.

166. Патент № 2002/0076275 США, МПК F16B 1/00, F16D 1/00, B25G 3/02 (2006.01). Finger-joint in finger-jointed lumber : № 09/918,918 : заявлено 31.07.2001 : опубликовано 20.06.2002 / Hernandez R., Flach D.D. – 10 с.

167. Патент № 2003/0026955 США, МПК B32B 23/02 (2006.01). Wood product joint forming apparatus : № 10/122,829 : заявлено 15.04.2002 : опубликовано 06.02.2003 / Jon X. Giltner, Boulder, CO. – 19 с.

168. Патент № 2041809 Российская Федерация, МПК B27M 1/02 (2006.01). Способ получения прессованных изделий из древесины : № 92014698/15 : заявлено 28.12.1992 : опубликовано 20.08.1995 / Самодуров И.С. – 10 с.

169. Патент № 2300457 Российская Федерация, B27F 1/02 (2006.01). Способ торцевого сращивания заготовок из древесины : № 2005139925/03 : заявлено 21.12.2005 : опубликовано 10.06.2007 / Воякин А.С., Скуратов Н.В. ; заявитель МГУЛ. – 5 с.

170. Патент № 2694434 Российская Федерация, МПК B27M 1/02 (2019.02). Сборный пуансон для штампования древесины : № 2018122588 : заявлено 20.06.2018 : опубликовано 16.07.2019 / Рублева О.А. ; заявитель ВятГУ. – 9 с.

171. Патент № 2695387 Российская Федерация МПК A47B 96/00, B44C 1/24, B29C 43/00, B29C 70/58 (2006.01). Способ декорирования фасадов : № 2018131791: заявлено 03.09.2018 : опубликовано 23.07.2019 / Рублева О.А., Паскарь В.С. ; заявитель ВятГУ. – 10 с.

172. Патент № 2704849 Российская Федерация МПК В27М 1/08 (2006.01). Способ упрочняющей декоративной обработки изделий из древесины : № 2018122586 : заявлено 20.06.2018 : опубликовано 31.10.2019 / Рублева О.А., Тарбеева Н.А. ; заявитель ВятГУ. – 6 с.

173. Патент № 2741614 Российская Федерация МПК В27F 1/00 (2006.01). Способ формирования элементов шиповых соединений деревянных заготовок : № 2011116271/13 : заявлено 25.04.2011 : опубликовано 10.01.2013 / Рублева О.А. ; заявитель ВятГУ. – 8 с.

174. Патент № 3262723 США. Finger jointing of lumber : № 113528 : заявлено 26.05.1966 : опубликовано 26.07.1966 / Strickler M.D. – 10 с. – URL: <https://patents.google.com/patent/US3262723A/en> (дата обращения 06.05.2019).

175. Пауль, Э.Э. Древесиноведение : учебное пособие : / Э.Э. Пауль, В.Б. Звягинцев. – Минск : РИПО, 2017. – 284 с. – Режим доступа: по подписке. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=487934> (дата обращения: 24.08.2020).

176. Перегудов, Ф.И. Введение в системный анализ / Ф.И. Перегудов, Ф.П. Тарасенко. – Москва : Высшая школа, 1989. – 367 с.

177. Перельгин, Л.М. Древесиноведение : практическое пособие / Л.М. Перельгин. – Ленинград : 9-я типография Военного Издательства МВС СССР, 1949. – 372 с. – Режим доступа: по подписке. – URL: <http://biblioclub.ru/index.php?page=book&id=116367> (дата обращения: 25.08.2020).

178. Перельгин, Л.М. Строение древесины / Л.М. Перельгин. – Москва: АН СССР, 1954. – 199 с.

179. Пижурин, А. А. Моделирование и оптимизация процессов деревообработки / А. А. Пижурин, А. А. Пижурин. – Москва : МГУЛ, 2004. – 375 с.

180. Пижурин, А.А. Исследования процессов деревообработки / А.А. Пижурин, М.С. Розенблит. – Москва : Лесная промышленность, 1984. – 140 с.

181. Пластинин, С.Н. Производство клееной продукции на лесопильных предприятиях / С.Н. Пластинин. – Москва : Лесная промышленность, 1983. – 48 с.
182. Пономарев, В.С. Анализ реологической модели процесса самоформообразования клееных деревянных конструкций / В.С. Пономарев, Г.Г. Кашеварова // Современные технологии в строительстве. Теория и практика. – 2020. – Т. 1. – С. 15 – 20.
183. Попов, Н.А. Склеивание древесины (производство клееных заготовок) / Н.А. Попов. – Москва : Лесная промышленность, 1972. – 33 с.
184. Постановка и решение задачи с помощью надстройки «Поиск решения» // Microsoft [сайт]. – 2020. – URL: <https://support.microsoft.com/ru-ru/office> (дата обращения: 13.05.2020).
185. Пресс сращивания PSK-12000A // Интервесп – технологии успеха : [сайт]. – Москва, 2006. – URL: http://www.intervespstanki.ru/item/yongqiang_psk_12000a.htm (дата обращения: 01.08.2009).
186. Прессованная древесина и древесные пластики в машиностроении: справочник / П.Н. Хухрянский, П.Н. Житков, Ф.Я. Ковязин [и др.] ; под редакцией А.Г. Ракина. – Москва ; Ленинград : Машиностроение, 1965. – 148 с.
187. Прохоров, Ю.К. Управление качеством : учебное пособие / Ю.К. Прохоров. – Санкт-Петербург : СПбГУ ИТМО, 2007. – 144 с.
188. Пустовалова, И.О. Оценка уровня качества модульного паркета / И.О. Пустовалова, А.М. Шуплецова, О.А. Рублева // Общество, наука, инновации (НПК-2015) : сборник материалов всероссийской ежегодной научно-практической конференции. – Киров : ВятГУ, 2015. – С.748–751.
189. Путятин, Л.М. Экономика машиностроительных предприятий / Л.М. Путятин, А.Е. Путятин. – Москва : Академия, 2008. – 304 с.
190. Радчук, Л.И. Основы конструирования изделий из древесины: учебное пособие / Л.И. Радчук. – Москва : ГОУ ВПО МГУЛ, 2006. – 200 с.
191. Распоряжение Правительства РФ от 20 сентября 2018 г. № 1989-р О Стратегии развития лесного комплекса РФ до 2030 г. // Гарант. Ру: инфор-

мационно-правовой портал. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/71960006/> (дата обращения: 01.10.2020).

192. Распоряжение Правительства РФ от 26 сентября 2013 г. № 1724-р Об Основах государственной политики в области использования, охраны, защиты и воспроизводства лесов в РФ на период до 2030 г. // Гарант. Ру: информационно-правовой портал. – URL: <https://www.garant.ru/products/ipo/prime/doc/70361820/> (дата обращения: 01.10.2020).

193. РД 50-165-82. Методические указания. Товары народного потребления. Выбор номенклатуры потребительских свойств и показателей качества промышленных товаров народного потребления. Основные положения : руководящий нормативный документ / разработан Всесоюзным научно-исследовательским институтом стандартизации. – Москва : Издательство стандартов, 1980. – 31 с.

194. Редькин, А. К. Математическое моделирование и оптимизация технологий лесозаготовок / А.К. Редькин, С.Б. Якимович. – Москва : МГУЛ, 2005. – 504 с.

195. Рейнер, М. Реология / М. Рейнер; перевод с английского Н.И. Малинина. – Москва: Наука, 1965. – 221 с.

196. Рейхардт, А.Ю. Прессование и гнутье древесины / Рейхардт А.Ю., Хухрянский П.Н. – Москва, 1940. – 136 с.

197. Ржаницын, А.Р. Теоретические предпосылки к построению методов расчета деревянных конструкций во времени / А.Р. Ржаницын // Исследования прочности и деформативности древесины. – Москва, Издательство литературы по строительству и архитектуре, 1956. – С. 21–31.

198. Ржаницын, А.Р. Теория ползучести / А.Р. Ржаницын. – Москва: Стройиздат, 1968. – 418 с.

199. Ржаницын, А.Р. Теория расчета строительных конструкций на надежность / А.Р. Ржаницын. – Москва: Стройиздат, 1978. – 239 с.

200. Романов, В.Н. Системный анализ для инженеров: монография / В.Н. Романов. – Санкт-Петербург : СЗТУ, 2005. – 186 с.

201. РТМ 13-3300014-61-84. Руководящий технический материал по установлению допусков при конструировании типовых соединений составных частей изделий мебели. – Балобаново: ВНИИДрев, 1984. – 20 с.

202. Рублева О.А. Исследование влияния режимов торцового прессования на твердость дна проушин // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: материалы международной научно-технической конференции. – Вологда: ВоГТУ, 2012. – С. 105–107.

203. Рублева, О.А. Анализ моделей расчета силовых параметров при прессовании шиповых соединений деревянных заготовок / О.А. Рублева, Г.П. Кузнецов // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: материалы международной научно-технической конференции. – Вологда : ВоГТУ, 2005. – С. 83–84.

204. Рублева, О.А. Анализ современных требований по выбору посадок для клеевых соединений по длине на прямоугольные шипы / О.А. Рублева, А.Г. Гороховский // Актуальные проблемы развития лесного комплекса: материалы XVI Международной научно-технической конференции. – Вологда : ВоГУ, 2019. – С. 135–138.

205. Рублева, О.А. Вопросы практического применения дифференциального и комплексного методов при оценке уровня качества оборудования и продукции деревоперерабатывающих производств / О.А. Рублева // Общество. Наука. Инновации (НПК-2017) : сборник статей всероссийской ежегодной научно-практической конференции. – Киров : ВятГУ, 2017. – С. 2024–2033.

206. Рублева, О.А. Изменения структуры древесины сосны при внедрении призматического индентора вдоль волокон // Advanced science. – 2014. – №1 (4). – С. 194–208.

207. Рублева, О.А. Качество шипов, изготовленных холодным торцовым прессованием / О.А. Рублева, Г.П. Кузнецов // Вестник Московского государственного университета леса – Лесной вестник. – 2010. – № 4. – С. 160–163.

208. Рублева, О.А. Квалиметрический подход к оценке качества шиповых соединений деревянных заготовок // *Advanced science*. – 2012. – № 1. – С. 32–46.

209. Рублева, О.А. Методика и результаты экспериментальных исследований процесса формирования клеевых соединений на прямоугольные прессованные шипы / О.А. Рублева, А.Г. Гороховский, Е.Е. Шишкина. // *Хвойные бореальной зоны*. – 2020. – Т. XXXVIII, № 1-2. – С. 72–81.

210. Рублева, О.А. Методика определения рациональных значений режимных параметров процесса торцового прессования шипов / О.А. Рублева, А.Г. Гороховский, Е.Е. Шишкина // *Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века : труды XV Международного евразийского симпозиума*. – Екатеринбург : УГЛТУ, 2020. – С. 48–54.

211. Рублева, О.А. Методика проектирования технологического процесса изготовления прямоугольного шипового соединения способом прессования / О.А. Рублева // *Актуальные проблемы развития лесного комплекса: материалы международной научно-технической конференции*. – Вологда : ВоГТУ, 2008. – С. 67–69.

212. Рублева, О.А. Моделирование процесса прессования прямоугольных проушин в заготовках из древесины сосны / О.А. Рублева, Н.Н. Демидов // *Общество. Наука. Инновации (НПК-2020) : сборник статей XX Всероссийской научно-практической конференции*. – Киров : ВятГУ, 2020. – Т. 2. – С. 333–339.

213. Рублева, О.А. Опыт применения штампового инструмента для формирования прямоугольных проушин и шипов / О.А. Рублева // *Деревообрабатывающая промышленность*. – 2020. – № 2. – С. 27–34.

214. Рублева, О.А. Особенности технологической подготовки производства на малых мебельных предприятиях / О.А. Рублева // *Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика : сборник научных трудов по материалам международной заочной научно-технической*

конференции «Техника и технологии – мост в будущее». – Воронеж : ВГЛТА, 2014. – № 5 ч. 4 (10-4), – С. 260–264.

215. Рублева, О.А. Оценка качества шипового соединения дифференциальным методом / О.А. Рублева // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века : труды VII Международного евразийского симпозиума. – Екатеринбург : УГЛТУ, 2012. – С. 135–140.

216. Рублева, О.А. Оценка конкурентоспособности продукции деревопереработки / О.А. Рублева // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века : труды XII Международного евразийского симпозиума. – Екатеринбург : УГЛТУ, 2017. – С. 44–50.

217. Рублева, О.А. Оценка прочности клеевых соединений по длине на прямоугольные шипы / О.А. Рублева, А.Г. Гороховский // Лесная наука в реализации концепции уральской инженерной школы: социально-экономические и экологические проблемы лесного сектора экономики : материалы XII Международной научно-технической конференции. – Екатеринбург : УГЛТУ, 2019. – С. 59–61.

218. Рублева, О.А. Перспективы применения технологии торцового прессования для изготовления элементов шиповых соединений / О.А. Рублева, А.Г. Гороховский, Е.Е. Шишкина // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века : труды XIV Международного евразийского симпозиума. – Екатеринбург : УГЛТУ, 2019. – С. 63–68.

219. Рублева, О.А. Показатели качества шиповых соединений / О.А. Рублева // Актуальные проблемы и перспективы развития лесопромышленного комплекса: материалы международной научно-технической конференции, посвященной 50-летию кафедры механической технологии древесины ФГБОУ ВПО КГТУ. – Кострома : КГТУ, 2012. – С.88–90.

220. Рублева, О.А. Посадки в клеевых соединениях на прямоугольные шипы / О.А. Рублева, А.Г. Гороховский. – DOI 10.25730/VSU.0536.19.044 // Advanced Science. – 2019. – № 4 (15). – С. 45–49.

221. Рублева, О.А. Проблемы квалитетической оценки продукции и оборудования деревообрабатывающих производств на этапах определения цели оценки и выбора номенклатуры показателей / О.А. Рублева // *Advanced Science*. – 2017. – № 3. – С. 315–324.

222. Рублева, О.А. Прочность склеивания древесины по длине на прямоугольные шипы / О.А. Рублева, А.Г. Гороховский // *Хвойные бореальной зоны*. – 2019. – Т. XXXVII, № 5. – С. 358–366.

223. Рублева, О.А. Разработка технологического процесса производства арболитовых блоков с использованием инструментов многовариантного проектирования / О.А. Рублева, А.Г. Федоровский // *Вестник Поволжского государственного технологического университета. Серия: Материалы. Конструкции. Технологии*. – 2017. – № 1. – С. 69–79.

224. Рублева, О.А. Рациональные значения параметров процесса торцового прессования элементов шиповых соединений / О.А. Рублева. – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2020.2/18 // *Лесотехнический журнал*. – 2020. – № 2 (38). – С. 179–187.

225. Рублева, О.А. Результаты экспериментальных исследований твердости элементов шиповых соединений, полученных прессованием / О.А. Рублева // *Общество, наука, инновации (НТК-2012) : сборник материалов всероссийской ежегодной научно-технической конференции*. – Киров : ВятГУ, 2012. – С. 1291–1295.

226. Рублева, О.А. Технология формирования клеевых соединений на прессованные шипы // *Деревообрабатывающая промышленность*. – 2020. – № 3. – С. 19–26.

227. Рублева, О.А. Формирование прямоугольных шипов способом торцового прессования / О.А. Рублева. – DOI 10.12737/2191 // *Лесотехнический журнал*. – 2013. – № 4 (12). – С. 126–133.

228. Рублева, О.А. Формирование элементов шиповых соединений безотходным способом торцового прессования заготовок из древесины: дис-

сертификация на соискание ученой степени кандидата технических наук / О.А. Рублева; Вятский государственный университет. – Киров, 2011. – 216 с.

229. Рублева, О.А. Экспериментальная оценка влияния режимных параметров на энергосиловые показатели процесса торцового прессования многократных прямоугольных шипов / О.А. Рублева, А.Г. Гороховский, Е.Е. Шишкина, М.В. Газеев // Хвойные бореальной зоны. – 2020. – Т. XXXVIII, № 1-2. – С. 82–90.

230. Рублева, О.А. Экспериментальная оценка прочности склеивания древесины по длине на прямоугольные прессованные шипы / О.А. Рублева, А.Г. Гороховский. – DOI 10.37482/0536-1036-2020-3-128–142 // Лесной журнал. – 2020. – № 3. – С. 128–142.

231. Руководство по изготовлению и контролю качества деревянных клееных конструкций / Центральный научно-исследовательский институт строительных конструкций имени В.А. Кучеренко. – Москва : Стройиздат, 1982. – 79 с.

232. Свиридов, Л.Т. Основы научных исследований : учебник / Л.Т. Свиридов, А.И. Третьяков. – Воронеж, 2016. – 362 с.

233. Системный анализ и принятие решений / А.К. Колмаков : Системный анализ : [сайт]. – 2009. – URL: <http://www.kolanat.ru/> (дата обращения: 01.08.2009).

234. Системный подход к познанию систем любой физической природы // Окно в Живую Вселенную : Центр системных исследований «Интегро» [сайт]. – Уфа, 2001. – URL: http://www.integro.ru/system/s_ots.htm (дата обращения: 01.08.2009).

235. Системы торцового сращивания // Глобал Эдж [сайт]. – Москва, 1998. [сайт]. – URL: http://www.globaledge.ru/temp/catalog/oborudovanie/linii_srawivaniya/index.html (дата обращения: 01.08.2009).

236. Склеивание древесины за рубежом / В.М. Хрулев, А.С. Фрейдин, А.С. Белозерова, В.В. Аксенов; под редакцией А.Б. Губенко. – Москва ; Ленинград : Гослесбумиздат, 1961. – 302 с.

237. СНиП II-25-80. Деревянные конструкции : строительные нормы и правила / разработаны Центральным научно-исследовательским институтом строительных конструкций имени В.А. Кучеренко. – Москва. : ФГУП ЦПП, 2005. – 30 с.

238. Соболев, Ю.С. Влияние масштабного фактора на значения предела прочности клееной древесины при сжатии / Ю.С. Соболев // Лесной журнал. – 1976. – № 6. – С. 22–54.

239. Соболев, Ю.С. Древесина как конструкционный материал / Ю.С. Соболев. – Москва : Лесная промышленность, 1979. – 248 с.

240. Соболев, Ю.С. Исследование упругих постоянных древесины: диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Ю.С. Соболев; Московский лесотехнический институт. – Москва, 1959. – 248 с.

241. СП 64.13330.2017. Деревянные конструкции : свод правил : актуализированная редакция СНиП II-25-80: дата введения 2017-08-28 / разработаны Центральным научно-исследовательским институтом строительных конструкций имени В.А. Кучеренко. – Москва : Стандартинформ, 2019. – 140 с.

242. Спиридонов, А.А. Планирование эксперимента при исследовании технологических процессов / А.А. Спиридонов. – Москва : Машиностроение, 1981. – 184 с.

243. Справка и обучение по Excel // Microsoft [сайт]. – 2020. – URL: <https://support.microsoft.com/ru-ru/excel> (дата обращения: 04.07.2020).

244. Справочник по деревообработке / В.Д. Бахтеяров, Р.П. Антонова, С.А. Ильинский [и др.]. – Москва : Лесная промышленность, 1975. – 536 с.

245. Справочник по функционально-стоимостному анализу / А.П. Ковалев, Н.К. Моисеева, В.В. Сысун [и др.] ; под редакцией М.Г. Карпунина, Б.И. Майданчика. – Москва : Финансы и статистика, 1988. – 431 с.

246. Справочное руководство по древесине / Лаборатория лесных продуктов США. ; перевод с английского Я.П. Горелика и Т.В. Михайловой ;

под редакцией С.Н. Горшина, А.Н. Кириллова, В.Е. Кузнецова [и др.] – Москва : Лесная промышленность, 1979. – 544 с.

247. Сращивание по длине с помощью ласточкиного хвоста // Woodtools – все о столярном деле : [сайт]. – 2006. – URL: <http://forum.woodtools.ru/index.php/topic,4720.0.html> (дата обращения: 09.08.2009).

248. Статистика для менеджеров с использованием Microsoft Excel, 4 изд. : перевод с английского / Д.М. Левин, Д. Стефан, Т.С. Кребиль, М.Л. Беренсон. – Москва : Издательский дом «Вильямс», 2004. – 1312 с.

249. СТО 36554501-001-2006. Деревянные клееные конструкции. Методы испытаний клеевых соединений при изготовлении : стандарт организации : дата введения 2006-04-03. – Москва : ФГУП НИЦ «Строительство», 2006. – 14 с.

250. СТО 36554501-002-2006. Деревянные клееные и цельнодеревянные конструкции. Методы проектирования и расчета : стандарт организации : дата введения 2006-05-15. – Москва : ФГУП НИЦ «Строительство», 2006. – 74 с.

251. СТО 36554501-033-2014. Деревянные клееные конструкции несущие. Общие технические условия : стандарт организации : дата введения 2014-07-01. – Москва : ОАО НИЦ «Строительство», 2014. – 22 с.

252. СТО 36554501-034-2014. Конструкции деревянные. Классы прочности конструкционных пиломатериалов и методы их определения : стандарт организации : дата введения 2014-07-01. – Москва : ОАО НИЦ «Строительство», 2014. – 21 с.

253. СТО 36554501-035-2014. Конструкции деревянные клееные несущие. Классы прочности элементов конструкций и методы их определения : стандарт организации : дата введения 2014-07-01. – Москва : ОАО НИЦ «Строительство», 2014. – 18 с.

254. СТО 36554501-036-2014. Конструкции деревянные клееные. Методы испытаний по определению прочности клеевых соединений : стандарт

организации : дата введения 2014-07-01. – Москва : ОАО НИЦ «Строительство», 2014. – 25 с.

255. СТО 36554501-038-2014. Конструкции деревянные клееные. Методы испытаний по определению прочности клеевых соединений : стандарт организации : дата введения 2014-07-01. – Москва : ОАО НИЦ «Строительство», 2014. – 16 с.

256. Стовпюк, Ф.С. Технология изделий из древесины. Расчет допусков / Ф.С. Стовпюк. – Ленинград : ЛТА, 1986. – 80 с.

257. Струченков, В. И. Методы оптимизации в прикладных задачах / В.И. Струченков. – Москва : Солон-пресс, 2012. – 320 с.

258. Тарбеева, Н.А. Влияние влажности древесины на показатели качества прессованных заготовок / Н.А. Тарбеева, О.А. Рублева // Общество. Наука. Инновации (НПК-2018) : сборник статей XIX Всероссийской научно-практической конференции. – Киров : ВятГУ, 2019. – Т. 2. – С. 380–386.

259. Тарбеева, Н.А. Обоснование выбора технологических режимов обработки заготовок из древесины сосны для изготовления облицовочной плитки / Н.А. Тарбеева, О.А. Рублева // Научное творчество молодежи – лесному комплексу России : материалы XVI Всероссийской научно-технической конференции студентов и аспирантов. – Екатеринбург : УГЛТУ, 2020. – С. 131–134.

260. Тарбеева, Н.А. Обоснование технологических возможностей способа упрочняющей декоративной обработки низкотоварной древесины / Н.А. Тарбеева, О.А. Рублева – DOI 10.34220/issn.2222-7962/2020.3/14 // Лесотехнический журнал. – 2020. – № 3 (39). – С. 145–154.

261. Тарбеева, Н.А. Экспериментальное исследование влияния режимов пьезотермической обработки на степень уплотнения заготовок из древесины сосны / Н.А. Тарбеева, О.А. Рублева // Деревообработка: технологии, оборудование, менеджмент XXI века : труды XIV Международного евразийского симпозиума. – Екатеринбург : УГЛТУ, 2019. – С. 75–81.

262. Терминологический справочник // ARTconservation-мастерская : [сайт]. – 2007. – URL: <http://art-con.ru/node/1121/> (дата обращения: 09.08.2009).

263. Технологический процесс производства цельнопрессованной древесины // Деревообработка, лесоматериалы : [сайт]. – 2009. – URL: <http://woodproduction.ru/archives/tag/drevesina/page/11> (дата обращения: 09.08.2009).

264. Тихонов, Р. М. Конкурентоспособность промышленной продукции / Р.М. Тихонов. – Москва : Издательство стандартов, 1996. – 203 с.

265. Точность деталей и сборочных единиц. Часть 2 : методические указания / Ю.И. Ветошкин, О.Н. Чернышев, И.В. Яцун [и др.]. – Екатеринбург : УГЛТУ. – 49 с.

266. Трусова, Л.И. Экономика машиностроительного производства. Задачи и ситуации: учебное пособие / Л.И. Тусова. – Ульяновск: УлГТУ, 2005. – 70 с.

267. Тутурин, С.В. Влияние масштабного фактора на прочность древесины / С.В. Тутурин, М.Р. Короткина // Вестник МГУЛ – Лесной вестник. – 2004. – № 3 (34). – С. 186–195.

268. Тутурин, С.В. Механическая прочность древесины: диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук / С.В. Тутурин : Московский государственный университет. – Москва, 2005. – 318 с.

269. Тюленева, Е. М. Уточнение реологической модели древесины // Хвойные бореальной зоны. – 2008. – Т. 25. – № 1-2. – С. 179–183.

270. Тюленева, Е.М. Феноменологический и молекулярный подход в изучении реологических свойств древесины // Сборник научных трудов SWorld. – 2011. – Т. 3. – № 2. – С. 47 – 50.

271. Тюленева, Е.М. Экспериментальное определение модуля упругости первого рода / Е.М. Тюленева, В.Н. Курицын // Лесной и химический комплексы – проблемы и решения: сборник статей. – Красноярск, 2004. – С. 113–114.

272. Тюленева, Е.М. Экспериментальное уточнение реологической модели древесины : диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук / Е.М. Тюленева ; Сибирский государственный технологический университет. – Красноярск, 2009. – 21 с.
273. Уголев, Б.Н. Деформативность древесины и напряжения при сушке / Б.Н. Уголев. – Москва: Лесная промышленность, 1971. – 176 с.
274. Уголев, Б.Н. Древесиноведение и лесное товароведение : учебник / Б.Н. Уголев. – Москва : МГУЛ, 2007. – 352 с.
275. Уголев, Б.Н. Древесиноведение с основами лесного товароведения : учебник / Б.Н. Уголев. – Москва : МГУЛ, 2001. – 340 с.
276. Уемов, А.И. Системный подход и общая теория систем /А.И. Уемов. – Москва : Мысль, 1978. – 272 с.
277. Управление качеством продукции : справочник / В.Я. Белобрагин, А.М. Бендерский, В.И. Газанчян [и др.] ; под редакцией В.В. Бойцова, А.В. Гличева. – Москва : Издательство стандартов, 1985. – 464 с.
278. Утробин, С.А. Классификация рельефов на деталях из древесины и технологических процессов для их изготовления / С.А. Утробин // Наука – производство – технология – экология : сборник материалов ежегодной региональной научно-технической конференции ВятГТУ.– Киров : ВятГТУ, 2000. – Т. 3. – С. 91–92.
279. Федоровский, А.Г. Квалиметрическая оценка арболита / А.Г. Федоровский, О.А. Рублева // Актуальные проблемы лесного комплекса : сборник научных трудов. – Брянск: БГИТУ, 2015. – Выпуск 43. – С. 193–196.
280. Федоровский, А.Г. Оценка уровня качества арболитовых блоков / А.Г. Федоровский, О.А. Рублева. – DOI 10.12737/15134 // Актуальные направления научных исследований XXI века: теория и практика : сборник научных трудов. – Воронеж, ВГЛУ, 2015. – № 7. – Ч. 3 (18-3). – С. 107–110.
281. Федюкин, В.К. Основы квалиметрии. Управление качеством продукции: Учеб. пособие. – М.: Филинь, 2004. – 296 с.

282. Филоненко-Бородич, М.М. Теория упругости / М.М. Филоненко-Бородич. – Москва: Государственное издательство физико-математической литературы, 1959. – 364 с.

283. Фрезы для сращивания // Станкоинструмент: [сайт]. – ООО «Станкоинструмент», 2012-2018. – URL: http://stanokspb.ru/instrument/frezy-nasadnie/frezyi_dlya_srashhivaniya/ (дата обращения: 25.12.18).

284. Фрейдин, А.С. Прогнозирование свойств клеевых соединений древесины / А.С. Фрейдин, К.Т. Вуба. – Москва : Лесная промышленность, 1980. – 224 с.

285. Халафян, А.А. Промышленная статистика : Контроль качества, анализ процессов, планирование экспериментов в пакете STATISTICA / А.А. Халафян. – Москва : Книжный дом «ЛИБРОКОМ», 2013. – 384 с.

286. Халафян, А.А. Теория вероятностей, математическая статистика и анализ данных : Основы теории и практика на компьютере. STATISTICA. EXCEL : Более 150 примеров решения задач / А.А. Халафян, В.П. Боровиков, Г.В. Калайдина. – Москва : URSS, 2017. – 317 с.

287. Хрулев, В.М. Склеивание древесины за рубежом / В.М. Хрулев, А.С. Фрейдин, А.С. Белозерова ; под редакцией А.Б. Губенко. – Москва : Гослесбумиздат, 1961. – 302 с.

288. Хуажев, О.З. Формирование декоративных элементов мебели из древесины методом термопрессования : автореферат диссертации на соискание ученой степени доктора технических наук / О.З. Хуажев ; Московский государственный лесотехнический институт. – Воронеж, 2000. – 32 с.

289. Хухрянская, Т.П. Влияние прессования на структуру древесины осины и сосны / Т.П. Хухрянская // Труды Института леса, АН СССР. – 1953. – Т. 9. – С. 444–447.

290. Хухрянская, Т.П. Древесина торцевого гнущья : автореферат диссертации на соискание ученой степени кандидата технических наук / Т.П. Хухрянская ; Московский лесотехнический институт. – Воронеж, 1963. – 18 с.

291. Хухрянская, Т.П. Рентгеноструктура березы торцевого гнущья / Т.П. Хухрянская // Лесной журнал. – 1961. – № 2. – С. 130–133.
292. Хухрянский, П.Н. Прессование древесины / П.Н. Хухрянский. – Москва ; Ленинград : Гослесбумиздат, 1949. – 160 с.
293. Хухрянский, П.Н. Прессование древесины / П.Н. Хухрянский. – Москва : Лесная промышленность, 1964. – 352 с.
294. Хухрянский, П.Н. Прессование и гнущье древесины / П.Н. Хухрянский. – Москва ; Ленинград : Гослесбумиздат, 1956. – 244 с.
295. Хухрянский, П.Н. Прочность древесины / П.Н. Хухрянский. – Москва ; Ленинград : Гослесбумиздат, 1955. – 152 с.
296. Черемных, Н.Н. Методология комплексного решения задач совершенствования оборудования и технологических процессов лесопильно-деревообрабатывающих производств в направлении снижения шума / Н.Н. Черемных // Вестник московского государственного университета леса – Лесной вестник. – 2013. – № 3. – С. 130–133.
297. Чернышев, А.Н. Конструирование полотен столярных и мебельных изделий при их бесшипном склеивании / А.Н. Чернышев, Е.М. Разиньков // Актуальные проблемы лесного комплекса. – 2012. – № 34. – С. 96–100.
298. Чубинский, А.Н. Формирование клеевых соединений древесины / А.Н. Чубинский. – Санкт-Петербург : СПбГУ, 1992. – 168 с.
299. Шамаев, В.А. Прессованная древесина в машиностроении: справочник / В.А. Шамаев, А.И. Смоляков, В.П. Чаадаев [и др.]. – Воронеж : ВГЛТА, 2005. – 91 с.
300. Шведов В. Н. Сопротивление древесины смятию в отверстии штампом крестообразного сечения // Известия высших учебных заведений. Строительство. – 1992. – №. 9-10. – С. 143–144.
301. Шемякин Е. И., Тутурин С. В., Короткина М. Р. Разрушение древесины при сжатии // Лесной вестник. – 2005. – №. 3. – С. 56–70.

302. Шеффе, Г. Дисперсионный анализ / Г. Шеффе : перевод с английского Б.А. Севастьянова и В.П. Чистякова. – Москва : Наука. Главная редакция физико-математической литературы, 1980. – 512 с.

303. Шишкина, Е.Е. Оптимизация структуры и величины параметров режимов конвективной сушки пиломатериалов по показателям эффективности и качества / Е.Е. Шишкина, А.Г. Гороховский // Известия Санкт-Петербургской лесотехнической академии. – Вып. 213. – Санкт-Петербург : СПбГЛТУ, 2015. – С. 232–241.

304. Штойер, Р. Многокритериальная оптимизация. Теория, вычисления и приложения / Р. Штойер ; перевод с английского Е.М. Столяровой ; под редакцией А.В. Лотова. – Москва : Радио и связь, 1992. – 504 с.

305. Экономика машиностроения: учебник / Под редакцией Е.М. Карлика. – Ленинград : Машиностроение, 1985. – 392 с.

306. Яцун, И. В. Исследование физико-механических и рентгенозащитных свойств древокомпозиционного слоистого материала «Фанотрен Б» / И.В. Яцун, А.Г. Гороховский, С.А. Одинцева. – DOI 10.17238/issn0536-1036.2019.3.110 // Лесной журнал. – 2019. – № 3. – С. 110–120.

307. Aicher, S. Investigations on the influence of finger-joint geometry on tension strength of finger-jointed glulam lamellas / S. Aicher, B. Radovic // Holz als Roh-und Werkstoff. – 1999. – Т. 57. – № 1. – С. 1–11.

308. Aman, R.L. An evaluation of loose tenon joint strength / R.L. Aman, H.A. West, D.R. Cormier // Forest products journal. – 2008. – Т. 58. – № 3. – С. 61–64.

309. Anatomical properties and process parameters affecting blister/blow formation in densified European aspen and downy birch sapwood boards by thermo-hygro-mechanical compression / S.A. Ahmed, T. Morén, O. Hagman [at al]. – DOI 10.1007/s10853-013-7679-9 // Journal of Materials Science. – 2013. – № 48 (24). – С. 8571–8579.

310. Ayata, U. Effect of heat treatment on the surface of selected exotic wood species / U. Ayata, L. Gurleyen, B. Esteves. – DOI 10.12841/wood.1644-3985.198.08 // *Drewno*. – 2017. – № 60 (199). – C. 105–116.

311. Bami, L.K. Bioresistance of poplar wood compressed by combined hydro-thermo-mechanical wood modification (CHTM). Soft rot and brown-rot. / L.K. Bami, B. Mohebbi. – DOI 10.1016/j.ibiod.2011.03.011 // *International Biodeterioration & Biodegradation*. – 2011. – № 65 (6). – C. 866–870.

312. Barboutis, I. Strength of finger-jointed beech wood (*Fagus sylvatica*) constructed with small finger lengths and bonded with PU and PVAC adhesives / I. Barboutis, V. Vasileiou // *PROLigno*. – 2013. – T. 9. – № 4. – C. 359–364.

313. Benabou, L. Kink band formation in wood species under compressive loading / L. Benabou. – DOI 10.1007/s11340-007-9098-9 // *Experimental Mechanics*. – 2008. – № 48 (5). – C. 647–656.

314. Benabou, L. Predictions of compressive strength and kink band orientation for wood species / L. Benabou. – DOI 10.1016/j.mechmat.2009.11.015 // *Mechanics of Materials*. – 2010. – № 42 (3). – C. 335–343.

315. Bending moment capacities of L-shaped mortise and tenon joints under compression and tension loadings / A. Kasal, C.A. Eckelman, E. Haviarova [et al.]. – DOI 10.15376/biores.10.4.7009-7020 // *BioResources*. – 2015. – T. 10. – № 4. – C. 7009–7020.

316. Bending moment capacity of simple and haunched mortise and tenon furniture joints under tension and compression loads / J. Oktaee, G. Ebrahimi, M. Layeghi [et al.]. – DOI 10.3906/tar-1211-74 // *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. – 2014. – T. 38. – № 2. – C. 291–297.

317. Biechele, T. Assessing stiffness on finger-jointed timber with different non-destructive testing techniques / T. Biechele, Y.H. Chui, M. Gong // *Proceedings of: The Future of Quality Control for Wood & Wood Products / The Final Conference of COST Action E53, 4–7th May 2010, Edinburgh*. – 2010. – C. 4–7.

318. Blomberg, J. Plastic deformation in small clear pieces of Scots pine (*Pinus sylvestris*) during densification with the CaLignum process / J. Blomberg,

B. Persson. – DOI 10.1007/s10086-003-0566-2 // Journal of Wood Science. – 2004. – T. 50. – № 4. – C. 307–314.

319. Changes in the properties of light-irradiated wood with heat treatment. Part 1. Effect of treatment conditions on the change in colour / K. Mitsui, H. Takada, M. Sugiyama, R. Hasegawa. – DOI 10.1515/HF.2001.098 // Holzforschung. – 2001. – № 55 (6). – C. 601–605.

320. Characterization of thermally modified wood at different industrial conditions / R. Herrera, T. Krystofiak, J. Labidi, R. Llano-Ponte. – DOI 10.12841/wood.1644-3985.C05.15 // Drewno. – 2016. – № 59 (197). – C. 151–164.

321. Compressive-molding of wood by high-pressure steam-treatment: Part I. Development of compressive molded squares from thinnings / Y. Ito, M. Tanahashi, M. Shigematsu [et al.]. – DOI 10.1515/hfsg.1998.52.2.211 // Holzforschung. – 1998. – № 52 (2). – C. 211–216.

322. Densified wood anatomical structure and the effect of heat treatment on the recovery of set / A. Darwis, I. Wahyudi, W. Dwianto, T.D. Cahyono. – DOI 10.1007/s13196-017-0184-z // Journal of the Indian Academy of Wood Science. – 2017. – № 14 [1]. – C. 24–31.

323. Dependence of roughness change and crack formation on parameters of wood surface embossing / M. Gaff, M. Sarvašová-Kvietková, M. Gašparík, M. Slávik // Wood Research. – 2016. – T. 61. – № 1. – C. 163–174.

324. Derikvand, M. Experimental shape optimization of floating-tenon connections / M. Derikvand, H. Pangh, G. Ebrahimi // Proceedings of: The 27th International Conference Research for Furniture Industry. – 2015. – C. 39–47.

325. Derikvand, M. Strength performance of mortise and loose-tenon furniture joints under uniaxial bending moment / M. Derikvand, G. Ebrahimi. – DOI 10.1007/s11676-014-0479-5 // Journal of forestry research. – 2014. – T. 25. – № 2. – C. 483–486.

326. Džinčić, I. The influence of fit on the distribution of glue in oval tenon/mortise joint / I. Džinčić, D. Živanić // Wood Research. – 2014. – Т. 59. – № 2. – С. 297–302.

327. Effect of Distance between Finger Tip and Root Width on Compressive Strength Performance of Finger-Jointed Timber / H.S. Ryu, S.Y. Ahn, H.M. Park [et al.] // Journal of the Korean Wood Science and Technology. – 2004. – Т. 32. – № 4. – С. 66–73.

328. Effect of tenon geometry, grain orientation, and shoulder on bending moment capacity and moment rotation characteristics of mortise and tenon joints / E. Likos, E. Haviarova, C. A. Eckelman [at al] // Wood and Fiber Science. – 2012. – Т. 44. – № 4. – С. 462–469.

329. Erdil, Y.Z. Bending moment capacity of rectangular mortise and tenon furniture joints / Y.Z. Erdil, A. Kasal, C.A. Eckelman // Forest Products Journal. – 2005. – Т. 55. – № 12. – С. 209.

330. Experimental and numerical analysis of CFRP-strengthened finger-jointed timber beams / M. Khelifa, A. Celzard, M. Oudjene, J. Ruelle. – DOI 10.1016/j.ijadhadh.2016.04.007 // International Journal of Adhesion and Adhesives. – 2016. – Т. 68. – С. 283–297.

331. Finger joints made with my box joint jig // An Engineers approach to woodworking: [сайт]. – 2018. – URL: https://woodgears.ca/box_joint/fingerjoint.html (дата обращения: 25.12.18).

332. Finger-jointed Eucalyptus globulus with 1C-PUR adhesive for high performance engineered laminated products / A.J. Lara-Bocanegra, A. Majano-Majano, J. Crespo, M. Guaita. – DOI 10.1016/j.conbuildmat.2017.01.004 // Construction and Building Materials. – 2017. – Т. 135. – С. 529–537.

333. Fojutowski, A. Physical and mechanical properties and resistance to fungi of Scots pine and birch wood modified thermally and using natural oil / A. Fojutowski, A. Noskowiak, A. Kropacz // Drewno. – 2009. – № 52 (181). – С. 43–62.

334. Gaff, M. Evaluation of wood surface quality after 3D molding of wood by pressing / M. Gaff, J. Gáborík // *BioResources*. – 2014. – T. 9. – № 3. – C. 4468–4476.
335. Gawroński, T. Rigidity-strength models and stress distribution in housed tenon joints subjected to torsion / T. Gawroński, J. Smardzewski // *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities (EJPAU)*. – 2006. – T. 9. – № 4. – Ст. 32.
336. Guidice, A. *The Seven Essentials of Woodworking*. Publisher / A. Guidice. – Sterling. – 2001. – 128 c.
337. Hassani, M.M. Rheological model for wood / M.M. Hassani, F.K. Wittel, S. Hering [at al] // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. – 2015. – T. 283. – C. 1032-1060.
338. Hesselbach, J. Punching in industrial wood machining: an alternative production process to drilling / J. Hesselbach, H.W. Hoffmeister, T. Looß. – DOI 10.1007/s11740-007-0061-5. // *Production Engineering*. – 2007. – T. 1. – № 4. – C. 365–370.
339. Hu, W. G. Optimal design of stretchers positions of mortise and tenon joint chair / W.G. Hu, W.L. Fu, H.Y. Guan // *Wood research*. – 2018. – T. 63. – № 3. – C. 505–516.
340. Hu, W.G. Finite element analysis of tensile load resistance of mortise-and-tenon joints considering tenon fit effects / W.G. Hu, H. Y. Guan, J.L. Zhang // *Wood and Fiber Science*. – 2018. – T. 50. – № 2. – C. 121–131.
341. Jokerst, R. W. *Finger-Jointed Wood Product* / R. W. Jokerst ; Forest Products Lab Madison Wi. – 1981. – №. FSRP-FPL-382. – 26 c.
342. Kink band initiation and band broadening in clear wood under compressive loading / J.S. Poulsen, P.M. Moran, C.F. Shih, E. Byskov. – DOI 10.1016/S0167-6636(96)00043-9 // *Mechanics of Materials*. – 1997. – № 25 (1). – C. 67–77.

343. Kollmann, F.P. Principles of wood science and technology. Vol. II Wood based materials / F.P. Kollmann, E.W. Kuenzi, A.J. Stamm ; Springer-Verlag New York Heidelberg. – Berlin, 1975. – 703 c.
344. Konopka, D. Numerical modelling of wooden structures / D. Konopka, C. Gebhardt, M. Kaliske // Journal of Cultural Heritage. – 2017. – T. 27. – C. 93–102.
345. Kruskal, W.H. Use of ranks in one-criterion variance analysis / W.H. Kruskal, W.A. Wallis // J. Amer. Statist. Assoc. – 1952. – T. 47. – C. 583–621.
346. Kruskal, W.H. Use of ranks in one-criterion variance analysis / W.H. Kruskal, W.A. Wallis // J. Amer. Statist. Assoc.– 1953. – T. 48. – C. 907–911.
347. Kučera, L.J. On the fracture morphology in wood / L.J. Kučera, M. Bariska // Wood Science and Technology. –1982. – T. 1. – № 4. – C. 241–259.
348. Kultikova, E.V. Structure and properties relationships of densified wood. / E.V. Kultikova ; M. Sc. Thesis, Virginia Polytechnic Institute and State University. – 1999. – 139 c.
349. Kumar, V.S. Compression and flexural properties of finger jointed mango wood sections / V.S. Kumar, C.M. Sharma, S. Gupta. – DOI 10.4067/s0718-221x2015005000015// Maderas. Ciencia y tecnología. – 2015. – T. 17. – № 1. – C. 151–160.
350. Kutnar, A. Compressed and moulded wood from processing to products / A. Kutnar, D. Sandberg, P. Haller. –DOI 10.1515/hf-2014-0187 // Holzforschung. – 2015. – № 69 (7). – C. 885–897.
351. Kutnar, A. Densification of wood / A. Kutnar, M. Šernek // Zbornik gozdarstva in lesarstva. – 2007. – № 82. – C. 53–62.
352. Lee, S.J. Structural Performance of Finger-Jointed Lumber with Different Joint Configurations / S.J. Lee, C.D. Eom, K.M. Kim // Journal of the Korean Wood Science and Technology. – 2011. – T. 39. – № 2. – C. 172–178.
353. Lenth, C. A. Moisture dependent softening behavior of wood / C.A. Lenth, F.A. Kamke // Wood and Fiber Science. – 2007. – T. 33. – № 3. – C. 492–507.

354. Linear viscoelasticity of hot-pressed hybrid poplar relates to densification and to the in situ molecular parameters of cellulose / I. Reiniati, N.B. Osman, A.G. Mc Donald, M.P. Laborie. – DOI 10.1007/s13595-014-0421-1 // *Annals of forest science*. – 2015. – T. 72. – № 6. – C. 693–703.

355. Mackerle, J. Finite element analyses in wood research: a bibliography / J. Mackerle // *Wood science and technology*. – 2005. – T. 39. – № 7. – C. 579–600.

356. Mann, H.B. On a test of whether one of two random variables is stochastically larger than the other / H.B. Mann, D.R. Whitney // *Annals of Mathematical Statistics*. – 1947. – № 18. – C. 50–60.

357. Mechanical and durability performance of THM-densified wood / F. Heger, M. Giroux, C. Welzbacher [et al.]. // *Proceedings of: Environmental Optimization of Wood Protection / Final Workshop Cost Action E, Portugal, 22–23 March 2004, Lisboa–Portugal*. – 2004. – T. 22. – C. 30–33.

358. Mechanical behaviour of finger joints at elevated temperatures / A. Frangi, M. Bertocchi, S. Clauß, P. Niemz // *Wood science and technology*. – 2012. – T. 46. – № 5. – C. 793–812.

359. Mechanical properties of finger jointed beams fabricated from eight Malaysian hardwood species / Z. Ahmad, W.C. Lum, S.H. Lee [et al.]. – DOI 10.1016/j.conbuildmat.2017.04.016 // *Construction and Building Materials*. – 2017. – T. 145. – C. 464–473.

360. Mohebbi, B. Combined hydro-thermo-mechanical modification (CHTM) as an innovation in mechanical wood modification / B. Mohebbi, H. Sharifnia-Dizboni, S. Kazemi-Najafi // *Proceedings of: The Fourth European Conference on Wood Modification*. – Stockholm: 2009. – C. 353–362.

361. Moran, P.M. Kink band formation and band broadening in fiber composites under compressive loading / P.M. Moran, X.H. Liu, C.F. Shih. – DOI 10.1016/0956-7151(95)00001-C // *Acta Metall Mater*. – 1995. – № 43 (8). – C. 2943–2958.

362. Morsing, N. Densification of Wood: The influence of hygrothermal treatment on compression of beech perpendicular to the grain : PhD thesis, Series

R No. 79 / N. Morsing, Technical University of Denmark (DTU). – Denmark, 2000. – 198 c.

363. Nairn, J.A. Numerical simulations of transverse compression and densification in wood / J.A. Nairn // *Wood and fiber science*. – 2007. – T. 38 (4). – C. 576–591.

364. Navi, P. Effects of thermo-hydro-mechanical treatment on the structure and properties of wood / P. Navi, F. Girardet. – DOI 10.1515/HF.2000.048 // *Holzforschung*. – 2000. – T. 54. – № 3. – C. 287–293.

365. Özçifçi, A. Structural performance of the finger-jointed strength of some wood species with different joint configurations / A. Özçifçi, F. Yapıcı. – DOI 10.1016/j.conbuildmat.2007.03.020 // *Construction and Building Materials*. – 2008. – T. 22. – № 7. – C. 1543–1550.

366. Prekrat, S. Effect of glue-line shape on strength of mortise and tenon joint / S. Prekrat, J. Smardzewski // *Drvna industrija*. – 2010. – T. 61. – №. 4. – C. 223–228.

367. Properties of solid wood and laminated wood lumber manufactured by cold pressing and heat treatment / J.H. Kwon, R.H. Shin, N. Ayilimis, T.H. Han. – DOI 10.1016/j.matdes.2014.05.032 // *Materials & Design (1980–2015)*. – 2014. – № 62. – C. 375–381.

368. Qing, H. 3D multiscale micromechanical model of wood: From annual rings to microfibrils / H. Qing, Jr L. Mishnaevsky // *International Journal of Solids and Structures*. – 2010. – T. 47. – №. 9. – C. 1253–1267.

369. Ratnasingam, J. Optimization of finger-jointing in rubberwood processing / J. Ratnasingam, F. Scholz. – DOI 10.1007/s00107-008-0295-8 // *European Journal of Wood and Wood Products*. – 2009. – T. 67. – №. 2. – C. 241–242.

370. Reiterer, A. Compressive behaviour of softwood under uniaxial loading at different orientations to the grain / A. Reiterer, S. E. Stanzl-Tschegg. – DOI 10.1016/S0167-6636(01)00086-2 // *Mechanics of materials*. – 2001. – T. 33. – № 12. – C. 705–715.

371. Rubleva, O. Structural changes of pine wood caused by local pressing in the longitudinal direction / O. Rubleva. – DOI 10.12841/wood.1644-3985.268.06 // *Drewno*. – 2019. – Т. 62. – № 204. – С. 23–39.

372. Rubleva, O.A. Prediction model for the pressing process in an innovative forming joints technology for woodworking / O.A. Rubleva, A.G. Gorokhovskiy – DOI 10.1088/1757-899X/537/2/022064 // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2019. – Т. 537. – № 2. – Ст. 022064.

373. Schrepfer, V. Anatomical structures in reshaped press-dried wood / V. Schrepfer, F.H. Schweingruber. – DOI 10.1515/hfsg.1998.52.6.615 // *Holzforchung – International Journal of the Biology, Chemistry, Physics and Technology of Wood*. – 1998. – № 52 (6). – С. 615–622.

374. Shapiro, S.S. An analysis of variance test for normality (complete samples) / S.S. Shapiro, M.B. Wilk // *Biometrika*. – 1965. – Т. 52. – С. 591–611.

375. Shapiro, S.S. An approximate analysis of variance test of normality / S.S. Shapiro, R.S. Francia // *J. Amer. Statist. Assoc.* – 1972. – Т. 337. – С. 215–216.

376. Sliker, A. Orthotopic strains in compression parallel to grain tests / A. Sliker // *Forest Products Journal*. – 1985. – № 35 (11–12). – С. 19–26.

377. Smardzewski, J. Stress distribution in angle joints of skeleton furniture / Smardzewski J., Papuga T. // *Electronic Journal of Polish Agricultural Universities, Wood Technology*. – 2004. – Т. 7. – № 1. – Ст. 5.

378. Standard and non-standard deformation behaviour of European beech and Norway spruce during compression / M. Brabec, J. Tippner, V. Sebera [at al]. – DOI 10.1515/hf-2014-0231 // *Holzforchung*. – 2015. – Т. 69. – № 9. – С. 1107–1116.

379. STATISTICA // StatSoft Russia : [сайт]. – Москва, 1999 - 2020. – URL: <http://statsoft.ru/#tab-STATISTICA-link> (дата обращения: 04.07.2020).

380. Surface modification of Scots pine: the effect of process parameters on the through thickness density profile / L. Rautkari, K. Laine, N. Laflin, M. Hughes // *Journal of materials science*. – 2011. – № 46 (14). – С. 4780–4786.

381. Tabarsa, T. Stress-strain response of wood under radial compression. Part I. Test method and influences of cellular properties. / T. Tabarsa, Y.H. Chui. – DOI 10.1179/wsc.2007.17.6.333 // Wood and Fiber Science. – 2007. – № 32 (2). – C. 144–152.

382. Tankut, A.N. The effects of joint forms (shape) and dimensions on the strengths of mortise and tenon joints / A.N. Tankut, N. Tankut // Turkish Journal of Agriculture and Forestry. – 2005. – T. 29. – №. 6. – C. 493–498.

383. Tankut, N. The effect of adhesive type and bond line thickness on the strength of mortise and tenon joints / N. Tankut. – DOI: 10.1016/j.ijadhadh.2006.07.003 // International journal of adhesion and adhesives. – 2007. – T. 27. – № 6. – C. 493–498.

384. The influence of heat treatment on the physico-chemical properties of pinewood (*Pinus sylvestris* L.) / J. Zawadzki, J. Gawron, A. Antczak, T. Klosinska [et al.]. – DOI 10.12841/wood.1644-3985.135.04 // Drewno. – 2016. – № 59 (196). – C. 49–57.

385. The pliability of wood and its application to molding / O. Yamashita, H. Yokochi, T. Miki, K. Kanayama // Journal of Materials Processing Technology. – 2009. – T. 209. – № 12–13. – C. 5239–5244.

386. Tran, V.D. FE analysis and geometrical optimization of timber beech finger-joint under bending test / V.D. Tran, M. Oudjene, P.J. Méausoone. – DOI 10.1016/j.ijadhadh.2014.03.007 // International Journal of Adhesion and Adhesives. – 2014. – T. 52. – C. 40–47.

387. Vrazel, M. The effects of species, adhesive type, and cure temperature on the strength and durability of a structural finger-joint / M. Vrazel, Jr T. Sellers // Forest products journal. – 2004. – T. 54. – № 3. – C. 66–76.

388. Wang, Y. Design and analysis on interference fit in the hardwood dowel-glued joint by finite element method / Y. Wang, S.H. Lee. – DOI 10.1016/j.proeng.2014.06.326 // Procedia Engineering. – 2014. – T. 79. – C. 166–172.

389. Wilcoxon, F. Individual Comparisons by Ranking Methods / F. Wilcoxon // *Biometrics Bulletin*. –1945. –№ 1. – С. 80–83.
390. Wilczyński, A. Effect of joint dimensions on strength and stiffness of tenon joints / A. Wilczyński, K. Warmbier // *Folia Forestalia Polonica*. – 2003. – Т. 34. – С. 53–66.
391. Withdrawal force capacity of mortise and loose tenon T-type furniture joints / M. Derikvand, J. Smardzewski, G. Ebrahimi [at al] // *Turkish Journal of Agriculture and Forestry*. – 2013. – Т. 37. – № 3. – С. 377–384.
392. Wood connections with a finger joint // Free construction plans for homemade scaffold furniture. – URL: <https://homemade-furniture.com/woodworking-joints/finger-joint/> (дата обращения: 25.12.18).

ПРИЛОЖЕНИЕ А

(обязательное)

НОМЕНКЛАТУРА ПОКАЗАТЕЛЕЙ КАЧЕСТВА ШИПОВЫХ СОЕДИНЕНИЙ

Таблица А.1

Группа показателей (уровень 1)	Подгруппа показателей (уровень 2)	Комплексные показатели K_j (уровень 3)		Единичные показатели P_i (уровень 4)	
		Индекс обозначения	Наименование	Индекс обозначения	Наименование
Показатели назначения	Классификационные показатели	1	Прочность склеивания	1	Прочность при растяжении
				2	Прочность при изгибе
				3	Прочность при скалывании
				4	Расчетная полезная нагрузка
		2	Физико-механические характеристики древесины	5	Плотность древесины
				6	Проницаемость жидкостями
				7	Прочность при сжатии вдоль волокон
				8	Прочность при сжатии поперек волокон
				9	Прочность при растяжении поперек волокон
				10	Прочность при статическом изгибе
				11	Прочность при скалывании вдоль волокон
				12	Прочность при скалывании поперек волокон
				13	Сопротивление местному смятию поперек волокон
				14	Модули упругости
				15	Коэффициенты поперечной деформации
				16	Модули сдвига
				17	Ударная вязкость
				18	Твердость

Группа показателей (уровень 1)	Подгруппа показателей (уровень 2)	Комплексные показатели K_j (уровень 3)		Единичные показатели P_i (уровень 4)		
		Индекс обозначения	Наименование	Индекс обозначения	Наименование	
		3	Геометрические размеры шипов	19	Износостойкость	
				20	Сопротивление раскалыванию	
				21	Длина шипа	
				22	Шаг соединения	
				23	Затупление шипа	
				24	Уклон шипа	
		25	Зазор в стыке			
		4	Направление шипов к пласти заготовки	26	Направление шипов к пласти заготовки (вертикальное, горизонтальное, диагональное)	
		Конструктивные показатели	5	Габаритные размеры заготовки	27	Максимальная длина
					28	Минимальная длина
	29				Максимальная площадь сечения	
	6		Требования к точности заготовки	30	Допуск точности угла по торцу	
				31	Допускаемые отклонения по толщине	
	7		Присоединительные размеры	32	Величина зазора или натяга	
	8		Коэффициент эффективности взаимозаменяемости	33	Коэффициент эффективности взаимозаменяемости	
	9		Удобство обработки	34	Самозаклинивание шипов при сборке	
				35	Усилие бокового обжатия	
				36	Удобство нанесения клея	
		37		Максимальное время хранения заготовок до нанесения клея		
		38		Величина провесов при сборке		

Группа показателей (уровень 1)	Подгруппа показателей (уровень 2)	Комплексные показатели K_j (уровень 3)		Единичные показатели P_i (уровень 4)		
		Индекс обозначения	Наименование	Индекс обозначения	Наименование	
	Показатели состава и структуры	10	Требования к влажности	39	Влажность заготовок	
				40	Допускаемый перепад влажности в склеиваемых заготовках	
		11	Длина трещин	41	Длина трещин, возникающих при запрессовке	
		12	Макроскопическое строение	42	Равноплотность древесины в обработанной зоне	
Показатели надежности	Показатели безотказности	13	Величина разбухания	43	Степень равнослойности древесины,	
				44	Разбухание при изменении влажности	
				45	Разбухание при склеивании	
		46	Разбухание при нанесении защитно-декоративных покрытий			
		14	Жесткость	47	Допускаемый прогиб	
		15	Формоустойчивость	48	Отклонения формы	
	16	Несущая способность	49	Коэффициент безопасности		
	Показатели сохраняемости	Показатели сохраняемости	17	Условия хранения	50	Жесткость условий хранения
			18	Условия транспортирования	51	Жесткость условий транспортирования
			19	Требования условий эксплуатации	52	Устойчивость к температурно-влажностным воздействиям
					53	Монтажная нагрузка
					54	Ветровая нагрузка
	55	Снеговая нагрузка				
	56	Устойчивость к воздействию кислорода воздуха				
	20	Коэффициент ремонтпригодности	57	Коэффициент ремонтпригодности		
	Показатели долговечности	Показатели долговечности	21	Средний срок службы	58	Средний срок службы
22			Долговечность	59	Долговечность по циклическим нагрузкам	

Группа показателей (уровень 1)	Подгруппа показателей (уровень 2)	Комплексные показатели K_j (уровень 3)		Единичные показатели P_i (уровень 4)		
		Индекс обозначения	Наименование	Индекс обозначения	Наименование	
Показатели экономичного использования сырья, материалов, топлива и энергии	Показатели экономного использования сырья и материалов	23	Удельный расход сырья	60	Размеры припуска на обработку	
		24	Удельный расход материалов	61	Удельный расход клея	
		25	Потери сырья	62	Доля брака	
		26	Стойкость инструмента	63	Наработка до перезаточки	
	Показатели экономичности энергопотребления	Показатели экономичности энергопотребления	27	Расход энергии	64	Усилие обработки (прессования, фрезерования и т.д.) шипов и проушин
			65	Время обработки	66	Усилие сборки
			67	Удельная суммарная трудоемкость склеивания заготовок	68	Структурная трудоемкость
Показатели технологичности	Основные показатели	28	Показатели трудоемкости	69	Удельная материалоемкость	
				70	Коэффициент использования материала	
		29	Показатели материалоемкости	71	Процент брака	
				72	Коэффициент сборности	
	Дополнительные показатели	30	Показатели унификации	73	Коэффициент сложности формы	
				74	Возможность дальнейшей обработки на типовых станках, при типовых режимах	
				75	Количество типоразмеров инструмента	
				76	Коэффициент технологичности механической обработки	
				77	Допускаемая нагрузка при транспортировке	
	31	Показатели транспортабельности	78	Время технологической выдержки до транспортировки		
			79	Влажность заготовок		
Эргономические	Гигиенические	32	Влажность древесины при обработке	79	Влажность заготовок	

Группа показателей (уровень 1)	Подгруппа показателей (уровень 2)	Комплексные показатели K_j (уровень 3)		Единичные показатели P_i (уровень 4)	
		Индекс обозначения	Наименование	Индекс обозначения	Наименование
показатели	показатели	33	Токсичность	80	Эмиссия клея
		34	Запыленность	81	ПДК пыли
		35	Шум	82	Шум оборудования
		36	Вибрации	83	Вибрации оборудования
	Психофизиологические показатели	37	Соответствие зрительным возможностям человека	84	Форма клеевого шва по пласти заготовки
				85	Форма клеевого шва по кромке заготовки
	38	Соответствие осязательным возможностям человека	86	Величина упругого восстановления древесины в зоне шва	
Экологические показатели	Показатели загрязнения окружающей среды	39	Наличие отходов и выбросов вредных веществ	87	Объем испарений клея
				88	Объем пыли
				89	Объем стружки
				90	Мощность аспирационной системы
Показатели безопасности	Основные показатели	40	Безопасность работы	91	Вероятность безопасной работы человека в течение определенного времени
				92	Коэффициент безопасности
		41	Пожарная безопасность	93	Класс помещения
		42	Механическая безопасность	94	Необходимость применения защитных устройств
Эстетические показатели	Информационная выразительность	43	Оригинальность формы	95	Оригинальность формы клеевого шва
		44	Стилевое соответствие	96	Стилевое соответствие
		45	Соответствие моде	97	Соответствие моде

Группа показателей (уровень 1)	Подгруппа показателей (уровень 2)	Комплексные показатели K_j (уровень 3)		Единичные показатели P_i (уровень 4)	
		Индекс обозначения	Наименование	Индекс обозначения	Наименование
	Рациональность формы	46	Функционально-конструктивная обусловленность	98	Соответствие формы соединения его назначению
	Целостность композиции	47	Организованность объемно-пространственной структуры	99	Масштаб и пропорции шва относительно детали
		48	Тектоничность	100	Тектоничность формы клеевого шва
		49	Пластичность	101	Пластичность формы клеевого шва
		50	Колорит и декоративность	102	Глубина деформированной зоны
		51	Качество макроструктуры	103	Изменения макроструктуры пластически деформированной зоны
				104	Изменения цвета деформированной зоны
				105	Изменения блеска деформированной зоны
				106	Необходимость цветового и текстурного подбора заготовок
	Совершенство производственного исполнения	52	Чистота выполнения контуров и сопряжений	107	Точность формы склеиваемой поверхности
				108	Шероховатость граней шипов
	Стабильность товарного вида	53	Тщательность покрытий и отделки	109	Качество защитно-декоративного покрытия в зоне клеевого шва
				54	Устойчивость к повреждениям
	111	Устойчивость к биологическим повреждениям			
	112	Устойчивость к воздействию кислорода воздуха			

Группа показателей (уровень 1)	Подгруппа показателей (уровень 2)	Комплексные показатели K_j (уровень 3)		Единичные показатели P_i (уровень 4)	
		Индекс обозначения	Наименование	Индекс обозначения	Наименование
Патентно-правовые показатели		55	Патентная защита	113	Коэффициент патентной защиты
		56	Патентная чистота	114	Коэффициент патентной чистоты
Экономические показатели		57	Цена	115	Цена
		58	Себестоимость изготовления	116	Удельная себестоимость изделия
				117	Сравнительная себестоимость

ПРИЛОЖЕНИЕ Б

(справочное)

ПАТЕНТЫ НА ИЗОБРЕТЕНИЯ

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ
НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2471614

**СПОСОБ ФОРМИРОВАНИЯ ЭЛЕМЕНТОВ ШИПОВЫХ
СОЕДИНЕНИЙ ДЕРЕВЯННЫХ ЗАГОТОВОК**

Патентообладатель(ли): *Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования "ВЯТСКИЙ
ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ" (ГОУ ВПО "ВятГУ") (RU)*

Автор(ы): *Рублева Ольга Анатольевна (RU)*

Заявка № 2011116271
Приоритет изобретения 25 апреля 2011 г.
Зарегистрировано в Государственном реестре
изобретений Российской Федерации 10 января 2013 г.
Срок действия патента истекает 25 апреля 2031 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности



Б.П. Симонов





РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2704849

Способ упрочняющей декоративной обработки изделий из древесины

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Вятский государственный университет" (ВятГУ) (RU)*

Авторы: *Рублева Ольга Анатольевна (RU),
Тарбеева Наталья Александровна (RU)*

Заявка № 2018122586

Приоритет изобретения 20 июня 2018 г.

Дата государственной регистрации в
Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 31 октября 2019 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 20 июня 2038 г.

Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности

Г.П. Ивлиев Г.П. Ивлиев

РОССИЙСКАЯ ФЕДЕРАЦИЯ



ПАТЕНТ

НА ИЗОБРЕТЕНИЕ

№ 2695387

Способ декорирования фасадов

Патентообладатель: *федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования "Вятский государственный университет" (ВятГУ) (RU)*

Авторы: *Рублева Ольга Анатольевна (RU),
Паскарь Вероника Сергеевна (RU)*

Заявка № 2018131791

Приоритет изобретения 03 сентября 2018 г.

Дата государственной регистрации в
Государственном реестре изобретений

Российской Федерации 23 июля 2019 г.

Срок действия исключительного права
на изобретение истекает 03 сентября 2038 г.



*Руководитель Федеральной службы
по интеллектуальной собственности*

Г.П. Ивлиев

ПРИЛОЖЕНИЕ В

(справочное)

АКТЫ И СПРАВКИ ОБ АПРОБАЦИИ И ВНЕДРЕНИИ

ООО «Техноресурс»
610020, г.Киров
ул.Московская, 40-43
ИНН 4345222876
т.(8332)708222

УТВЕРЖДАЮ



Технический директор

«Техноресурс»

А.В. Мартынов

12 сентября 2010 г.

А К Т

об использовании результатов
диссертационной работы
Рублевой Ольги Анатольевны

Комиссия в составе:

председатель технический директор Мартынов А.В.,
члены комиссии: технолог Арлаков Р.Ф.,
 дизайнер Ярунина М.В.

составили настоящий акт об использовании результатов диссертационной работы Рублевой Ольги Анатольевны в проектно-конструкторской деятельности ООО «Техноресурс» при разработке конструкции и технологии изготовления дверной филенки с использованием соединений по длине на прессованные шипы.

На предприятие были представлены:

- 1) технические предложения по разработке конструкции шиповых соединений;
- 2) рекомендации по геометрическим размерам элементов шиповых соединений: глубина проушины (высота шипа) 10 мм, ширина проушины 2 мм, шаг шипов 3,8 мм;

3) рекомендации по режимам прессования элементов шиповых соединений и влажности заготовок: давление при прессовании шипов в заготовках из древесины сосны 58 МПа, влажность древесины 10%;

4) рекомендации по выбору прессового оборудования и оснастки.

На изделие разработана технологическая документация, изготовлен опытный образец. Испытания шиповых соединений по длине на прочность по ГОСТ 15613.5 и 15613.4 показали, что прочность на растяжение составила 49 МПа, прочность на изгиб 52 МПа, что удовлетворяет требованиям ГОСТ 475 «Двери деревянные. Общие технические условия».

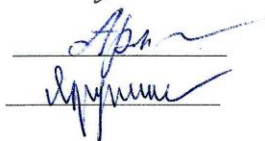
Использование указанных технических предложений и рекомендаций позволило снизить себестоимость изготовления шиповых соединений на 6,4% за счет сокращения затрат на инструмент и снижения энергоемкости процесса формирования шипов вследствие отказа от использования системы аспирации.

Председатель комиссии



А.В.Мартынов

Члены комиссии:



Арлаков Р.Ф.

Ярунина М.В.

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования
«Вятский государственный университет»
(ВятГУ)

СПРАВКА

7 июля 2020 года

№1

г. Киров

**О внедрении основных научных результатов диссертации
соискателя ученой степени Рублевой Ольги Анатольевны**

Настоящая справка подтверждает, что материалы диссертации Рублевой Ольги Анатольевны на тему «Формирование шиповых соединений деталей из древесины на основе технологии торцового прессования», представленной на соискание ученой степени доктора технических наук по научной специальности 05.21.05 Дровесиноведение, технология и оборудование деревопереработки, используются в учебном процессе кафедр «Машины и технологии деревообработки» и «Технология машиностроения» при изучении учебных дисциплин, подготовке выпускных квалификационных работ и научно-исследовательской деятельности обучающихся по образовательным программам:

- магистратуры по направлению подготовки 35.04.02 Технология лесозаготовительных и деревоперерабатывающих производств, профиль «Технология деревообработки»;

- аспирантуры по направлению подготовки 35.06.04 Технологии, средства механизации и энергетическое оборудование в сельском, лесном и рыбном хозяйстве, направленность (профиль) «Дровесиноведение, технология и оборудование деревопереработки»;

- магистратуры по направлению подготовки 15.04.05 «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств», профиль «Технология машиностроения».

В частности, в работу кафедр «Машины и технологии деревообработки» и «Технология машиностроения» внедрены результаты, представленные в таблице.

№ п/п	Результат исследования	Область применения	Подтверждающий документ
1	<p>- Теоретическое и экспериментальное обоснование закономерностей процесса формирования элементов шиповых соединений на основе технологии местного торцового прессования.</p> <p>- Этапы процесса деформирования древесины при внедрении призматического индентора вдоль волокон.</p> <p>- Анализ процессов деформирования древесины при внедрении призматического индентора вдоль волокон древесины.</p> <p>- Обоснование механизма формирования прямоугольной про-</p>	<p>Дисциплина «Прогрессивные технологии деревообработки», модуль «Модифицирование и пластическое деформирование древесины»:</p> <p>- лекция Л2.2 Технологические основы получения уплотненной древесины;</p> <p>- лекция Л2.3 Прессование древесины вдоль волокон;</p> <p>- лабораторные занятия Р2.1 Разработка схемы технологического процесса неравномерного прессования древесины;</p> <p>- Р2.2 Изучение структуры древесины, спрессованной вдоль волокон;</p> <p>- Р2.3 Измерение показателей каче-</p>	<p>- РПД «Прогрессивные технологии деревообработки» ID 93393,</p> <p>- ФОС дисциплины «Прогрессивные технологии деревообработки»,</p> <p>- онлайн-курс «Прогрессивные технологии деревооб-</p>

№ п/п	Результат исследования	Область применения	Подтверждающий документ
	ушины в процессе местного торцового прессования. - Определение граничных условий и моделирование процесса формообразования качественных отпечатков	ства заготовок, полученных методом холодного торцового прессования	работки» https://e.vyatsu.ru/course/view.php?id=450
4	- Систематизация направлений совершенствования процессов прессования древесины. - Теоретические основы формирования профилей на торцовых поверхностях заготовок из древесины методами пластического деформирования	Магистерская диссертация на тему «Совершенствование технологии формирования рельефных изображений на деревянных заготовках»	Комплект документов по ВКР магистранта гр. ТДм-21 Деньгина А.В.
5	- Механизм процесса пластического деформирования древесины в результате внедрения индентора вдоль волокон. - Моделирование и оценка напряженного состояния инструмента и заготовок на основе метода конечных элементов	Магистерская диссертация на тему «Совершенствование конструкции пуансона для торцового прессования древесины»	Комплект документов по ВКР магистранта гр. КТМм-2801-01-00 Семёшкиной Е.К.
6	- Результаты теоретических и экспериментальных исследований процесса формирования профильных отпечатков на основе технологии местного холодного торцового прессования	Организация научно-исследовательской деятельности обучающихся: - подготовка обучающихся к участию в международных и всероссийских научно-технических конференциях; - подготовка совместных публикаций в сборниках конференций; - подготовка совместных заявок на изобретения.	Список опубликованных в соавторстве с обучающимися научных трудов

Использование выводов и предложений диссертации Рублевой Ольги Анатольевны в работе кафедр «Машины и технологии деревообработки» и «Технология машиностроения» способствует повышению уровня качества подготовки магистров по направлению 35.04.02, аспирантов на направлении 06.04.01, магистров по направлению 15.04.05.

Проректор по образованию



 С.В. Никулин

Декан факультета технологий, инжиниринга и дизайна


 В.А. Лисовский


И.о. зав. кафедрой технологии машиностроения

 Д.Г. Сергеев

И.о. зав. кафедрой машин и технологий деревообработки

 Ш.В. Бузиков

 Директор Мир ПМ.

 4.9.3.2

УТВЕРЖДАЮ



Директор ООО «Эдан-Мебель»

А.М. Ветлужских

АКТ

ПРОИЗВОДСТВЕННЫХ ИСПЫТАНИЙ

г. Киров

«19» октября 2020 г.

Комиссия в составе:

- Ветлужских А.М. – директор ООО «Эдан-Мебель»,
- Попов Э.В. – гл. инженер ООО «Эдан-Мебель»

составила настоящий Акт о том, что в период с 31.08.2020 г. по 16.10.2020 г. на ООО «Эдан-Мебель» были проведены производственные испытания опытной технологии формирования шиповых соединений на основе способа местного торцевого прессования, разработанной сотрудником ВятГУ, доцентом кафедры машин и технологий Рублевой О.А.

1. Объект испытаний

Объектом производственных испытаний явилась новая технология формирования шиповых соединений, основанная на способе изготовления шипов прессованием за счет внедрения вдоль волокон древесины пуансона с профилем, соответствующим форме шипов.

2. Цель испытаний

Целью промышленных испытаний являлось подтверждение эффективности опытной технологии формирования шиповых соединений.

3. Задачи испытаний

- Подтверждение возможности использования предложенного способа торцевого прессования для изготовления шиповых соединений в заготовках, предназначенных для изготовления мебельной продукции из массивной древесины.
- Определение возможности механической и защитно-декоративной обработки заготовок, склеенных на прессованные шипы, в соответствии с принятыми на предприятии технологическими режимами.
- Определение соответствия качества мебельных изделий требованиям нормативной документации.

4. Условия испытаний

4.1 Характеристики обрабатываемых заготовок

Характеристика	Значение
Порода	сосна
Влажность	8±2 %
Наклон волокон	не более 12%
Размеры сечения	25×40 мм
Длина	120÷610 мм

4.2 Режимы прессования шипов

Параметр	Значение
Толщина шипа	2,3мм
Ширина проушины	2,2 мм
Шаг шипа	4,5 мм
Длина шипа	10 мм
Температура окружающей среды	22 °С
Усилие обжима заготовки	1 кН
Скорость прессования	4 мм/с
Усилие прессования	30 кН

4.3 Режимы склеивания

Параметр	Значение
Марка клея	Titebond II Premium (Franklin International)
Расход клея	110 - 130 г/м ²
Способ нанесения	двухсторонний
Время открытой выдержки	не более 15 с
Усилие запрессовки	3 кН
Время выдержки под давлением	10 с
Время технологической выдержки после склеивания	10 мин

5. Результаты испытаний

Проведенные испытания показали следующие результаты:

- предложенная технология позволяет изготовить шипы на торцах короткомерных заготовок длиной от 120 мм, которые не могут быть обработаны на фрезерном оборудовании;

- заготовки, обработанные способом местного торцового прессования при указанных режимах, имеют достаточно высокое качество. Полученные на торцах заготовок шипы имеют четкие контуры и высокую точность;
- склеивание по длине на прессованные шипы, осуществленное с указанным расходом клея, дает прочность склеивания, соответствующую нормативным требованиям, в частности, ГОСТ 15613.4 и ГОСТ 15613.5;
- режимы операций механической обработки склеенных по длине на прессованные шипы, а затем по ширине заготовок не отличаются от типовых режимов, используемых на предприятии; качество механической обработки в зонах склеивания следует признать хорошим;
- полученные соединения имеют эстетичный внешний вид, что позволяет применять их для изготовления изделий из массивной древесины с прозрачным защитно-декоративным покрытием наравне с заготовками, сращенными на зубчатые шипы;
- технология нанесения защитно-декоративных покрытий, применяемая на предприятии, применима к изделиям с новым типом соединений без снижения качества отделки; в зоне клеевых швов не отмечено недопустимых дефектов, а поднятие ворса встречается реже, чем на несращенных участках;
- качество изделия «стол обеденный», изготовленного с применением сращивания на прессованные шипы при изготовлении столешницы и ножек, соответствует нормативным требованиям, предъявляемым к мебели, в частности ГОСТ 16371, в том числе в части требований по величинам покоробленности, внешнему виду, отсутствию вырывов, трещин и других дефектов, параметрам шероховатости, точности, контролируемым показателям прочности и др.

6. Заключение

6.1 Предложенную технологию считать эффективной.

6.2 Признать изделия, изготовленные с применением новой технологии формирования соединений, отвечающими установленным требованиям.

6.3 Принять рекомендуемые режимы формирования соединений к внедрению в производство

Члены комиссии:



А.М. Ветлужских

Э.В. Попов

УТВЕРЖДАЮ
 Технический директор
 ООО ПКП «Алмис»
 М.Т. Скворцов



**АКТ
 промышленной апробации**

г. Киров

«26» октября 2020 г.

Комиссия в составе:

- Деветьяров Р.Н. – технический директор ООО ПКП «Алмис»,
- Булычев В.М. – гл. инженер ООО ПКП «Алмис»,
- Чубаков М.А. – технолог ООО ПКП «Алмис»

составила настоящий Акт о том, что в период с 28.09.2020 г. по 23.10.2020 г. на производственной площадке ООО ПКП «Алмис», расположенной по адресу: Кировская область, г. Слободской, пер. Бакулевский, д. 2, была проведена промышленная апробация опытной технологии формирования шиповых соединений, разработанной сотрудником ВятГУ, доцентом кафедры машин и технологий Рублевой О.А.

1. Объект испытаний

Объектом производственных испытаний явилась разработанная на основании проведенных исследований новая технология формирования шиповых соединений на основе способа торцового прессования, без использования требующего заточки режущего инструмента, в заготовках эксплуатационной влажности 12-14 %.

2. Цель и задачи

Целью промышленной апробации являлось подтверждение эффективности опытной технологии формирования шиповых соединений.

Задачи исследований:

- подтверждение возможности использования предложенного способа торцового прессования для изготовления шиповых соединений в заготовках, предназначенных для изготовления выпускаемой предприятием строганой продукции;
- определение возможности механической обработки заготовок, сращенных по длине на прессованные шипы, в соответствии с принятыми на предприятии технологическими режимами;

- определение соответствия качества полученных изделий применяемым на предприятии техническим условиям сортировки строганой продукции.

3. Условия апробации

3.1 Характеристики обрабатываемых заготовок:

- порода – сосна;
- влажность: 14 ± 2 %;
- вид пиломатериала – обрезной, с допустимыми пороками и обзолом.

3.2 Требования к изготавливаемой продукции:

- тип изделий: «свровагонка», «блок-хаус», «вагонка «штиль»;
- размеры изделий: сечение 12,5×90 мм, 19×90 мм, 14×110 мм соответственно; длина 2±6 м, 3±6 м, 3±6 м соответственно;
- допускаемые предельные отклонения: по длине ± 10 мм; по ширине $\pm 0,5$ мм; по толщине -0,5 мм;
- шероховатость поверхности по параметру $R_{m\max}$ (ГОСТ 7016), не более; для лицевых поверхностей 200 мкм, нелицевых поверхностей – 500 мкм;
- соответствие сортности (А, В или С), установленной по видам и количеству допускаемых пороков в соответствии с техническими условиями предприятия, разработанными на основе DIN 68126 / 86.

3.3 Режимы прессования шипов:

- толщина шипа – 2,2 мм;
- ширина проушины – 2,2 мм;
- шаг шипа – 4,4 мм;
- длина шипа – 10 мм;
- температура заготовок и инструмента – 19 °С;
- усилие обжима заготовки – до 1,7 кН;
- скорость прессования – 4 мм/с;
- усилие прессования – не более 52 кН.

3.4 Режимы склеивания:

- марка клея – Момент Столяр (ООО «Хенкель Рус»);
- расход клея – 130 - 150 г/м²;
- двухстороннее нанесение клея;
- усилие запрессовки – 5 кН;
- время выдержки под давлением – 15 с;
- время технологической выдержки после склеивания – 20 мин.

4. Результаты испытаний

Серия проведенных испытаний показала следующие результаты.

4.1 Предложенный способ торцового прессования позволяет формировать шипы прямоугольной формы сечения в заготовках с влажностью, соответствующей влажности готовой продукции - от 12 до 16 %, без дополнительного увлажнения или сушки древесины.

4.2 Подученные шипы соответствуют профилю штампового инструмента и имеют отклонения, не превышающие требований 12 качества точности.

4.3 Количество брака при прессовании шипов составляет не более 1,7 %.

4.4 Механическая обработка заготовок, сращенных на прессованные шипы, проведенная в соответствии с принятыми на предприятии технологическими режимами, позволяет обеспечить требуемую шероховатость поверхностей строганой продукции (не более $R_{a, макс}=180$ мкм для лицевых поверхностей и $R_{a, макс}=470$ мкм для нелицевых поверхностей), с малым количеством незначительных дефектов (в зоне сучков и клесвых швов), допускаемых по техническим требованиям предприятия.

4.5 Количество брака при механической обработке сращенных заготовок составляет не более 0,6 %.

4.6 Шипы и клесвой шов малозаметны, внешний вид полученных соединений в целом не снижает эстетических показателей продукции

4.7 Качество строганой продукции, изготовленной с применением сращивания на прессованные шипы, соответствует по техническим условиям предприятия сортности А в 68 % случаев, сортности В в 19 % случаев, сортности С в 13 % случаев.

4.8 Использование предложенной технологии обеспечивает дополнительный выход продукции до 7 % с 1 м³ за счет увеличения количества длинномерных заготовок, полученных при сращивании короткомерных отрезков.

5. Заключение

Проведенная промышленная апробация показала, что предложенная технология сращивания эффективна, позволяет повысить коэффициент использования древесных материалов при сохранении высокого качества продукции. Внедрение опытной технологии сращивания в производственные условия является целесообразным.

Члены комиссии:



Р.Н. Девятьяров

В.М. Бульчев

М.А. Чубаков