

Сопоставительный анализ результатов исследований различных клеев для узлов деревянных конструкций

Вопрос о создании узловых соединений деревянных конструкций, одновременно отвечающих высокой прочности и технологичности, является актуальным. В настоящей работе описаны экспериментальные исследования соединений древесины на клеенных стальных стержнях с использованием нескольких типов клеев. Выполнен сравнительный анализ полученных в ходе проведенных испытаний данных. Выявлены конструктивные особенности, позволяющие рационально проектировать узлы на клеенных стержнях в древесину. Сделаны выводы о характере работы рассматриваемого клеевого соединения.

Ключевые слова: древесина, арматура, стержень, клеивание, клей, исследование.



Erenchinov S. A., Minigaleeva S. A.

Comparative analysis of the results of studies of various adhesives for wooden structure units

The issue of creating knotty joints of wooden structures that simultaneously meet high strength and manufacturability is topical. This paper describes experimental studies of wood joints on glued steel rods using several types of adhesives. A comparative analysis of the data obtained during the tests has been performed. The design features that make it possible to rationally design nodes on glued rods in wood have been revealed. Conclusions about the nature of the work of the glue joint in question have been made.

Keywords: wood, fittings, rod, pasting, glue, research.

**Еренчинов
Сергей
Александрович**

кандидат технических наук,
доцент, Тюменский индустриальный университет (ТИУ), Тюмень, Российская Федерация

e-mail:
erenchinov@yandex.ru



**Минигалева
Снежана
Андреевна**

магистрант, Тюменский индустриальный университет (ТИУ), Тюмень, Российская Федерация

e-mail:
minigaleeva.s@yandex.ru

Введение

Разработка узловых соединений металлодеревянных конструкций связана с обеспечением технологичности и эффективности всей узловой системы в целом, способной выдерживать значительные нагрузки. В связи с этим в современном строительстве все чаще применяют металлические элементы для повышения прочности и надежности деревянных частей конструкций. Для рационального выбора какого-либо способа соединения конструкций необходимо учесть характер работы соединительных элементов. Несмотря на то, что существует множество типовых решений по созданию тех или иных видов узловых соединений металлодеревянных конструкций, все они имеют недостатки, которыми являются податливость, небольшой запас прочности, металлоемкость, недостаточная технологичность и значительная трудоемкость изготовления. На устранение имеющихся проблем направлены современные разработки новых конструктивных решений узлов, в частности, каждое из которых требует исследований и экспериментальных подтверждений.

Практическая значимость исследования заключается в разработке соединений деревянных элементов на клеенных стальных стержнях, создании практической методики изготовления и в выполнении оценки техноло-

гичности и эффективности рассматриваемого типа узлового соединения.

Наиболее эффективным и перспективным способом обеспечения достаточной несущей способности, высокой прочности, технологичности в изготовлении и экономичности в использовании применяемых материалов является создание узлов деревянных элементов при помощи вклеивания в них стальных стержней [2, 7].

В настоящее время широко применяемым связующим веществом при вклеивании арматурного стержня в древесину является эпоксидный клей [6; 8]. Он обладает хорошими прочностными и деформационными характеристиками, легкой доступностью. Несмотря на это, он имеет существенные недостатки. За счет того, что эпоксидный клей является двухкомпонентным, предварительно его необходимо замешивать, что, в свою очередь, снижает технологичность его применения. От правильного подбора смолы и отвердителя, их пропорций при смешивании, условий изготовления полностью зависит дальнейшая прочностная способность всего соединения. Неправильное и недостаточное соблюдение всех правил и мер защиты во время работы с данными компонентами может нанести вред здоровью человека.

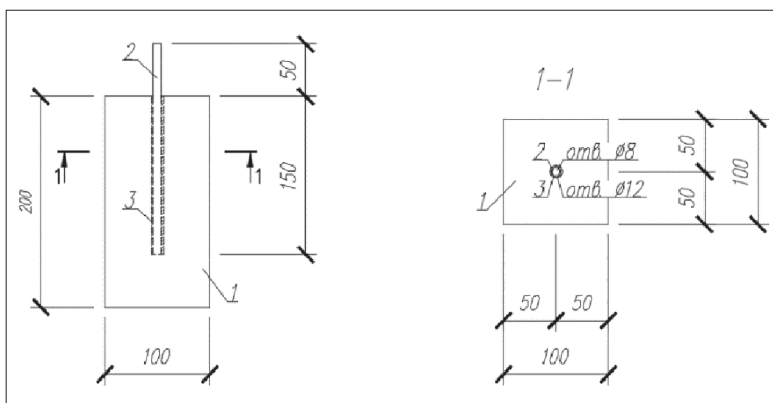


Иллюстрация 1. Схема испытываемого образца: 1 — деревянный брусок; 2 — арматурный стержень; 3 — клеевой состав. Авторы: С. А. Еренчинов, С. А. Минигалеева



Иллюстрация 2. Заполнение отверстий полиуретановым клеем. Фото: С. А. Еренчинов, С. А. Минигалеева



Иллюстрация 3. Погружение арматурного стержня. Фото: С. А. Еренчинов, С. А. Минигалеева

В связи с недостаточной изученностью применения иных типов клеев для изготовления клеевых соединений металлодеревянных элементов нами проведен ряд исследований по изучению процессов взаимодействия древесины с клеевыми материалами, такими как полиуретан и акрил [1; 4].

Материалы и изготовление образцов

Для выявления реальной работы клеевого соединения узлов деревянных конструкций в лаборатории кафедры строительных конструкций ТИУ проведен ряд лабораторных исследований клеенных стальных стержней в древесину с применением различных типов клеев.

Материалы, принятые для изготовления лабораторных образцов:

- деревянный брусок, имеющий поперечное сечение 100×100 мм и длину 200 мм. Породой древесины является сосна II сорта естественной влажности с плотностью 500 кг/м^3 и расчетным сопротивлением $3,2 \text{ МПа}$ [8];
- арматура периодического профиля класса А400 диаметром 8 мм, длиной 200 мм. Расчетное сопротивление растяжению составляет 400 МПа [9].

Образцы А1 — А5 — связующим материалом клеевого соединения является однокомпонентный акри-

ловый клей Lacrysil. Состав на основе акрила.

Образцы П1 — П5 — связующим материалом клеевого соединения является однокомпонентный полиуретановый клей Titebond Fast Set Construction Adhesive. Состав на основе полиуретана.

Общее количество изготовленных образцов для испытаний — 10 штук.

Для изучения работы данного узлового соединения и сопоставительного анализа результатов всех типов клеев принят двухкомпонентный эпоксидный клей, изготавливаемый из эпоксидно-диановой смолы ЭД-20 и полиэтиленполиамины (отвердитель ПЭПА) путем их смешивания в соотношении 10 : 1 [10; 11].

Вклеивание стержня осуществлялось в заранее проделанное отверстие вдоль волокон древесины согласно схеме (Иллюстрация 1).

Длина заделываемой части стержня при его диаметре 8 мм составляет 150 мм. Выступ анкера принят 50 мм. Диаметр отверстия в древесине превышает диаметр вклеиваемого стержня на 4 мм, соответственно, составляет 12 мм.

Непосредственно перед вклеиванием арматуры просверливались отверстия в теле брусков. Глубина контролировалась путем погружения анкера в отверстие без клея [11]. Арматура очищалась от грязи и ржавчины, обезжиривалась ацетоном. Перед началом заполнения отверстий клеем отверстие продувалось от опилок. Заполнение производилось последовательно, в один-два образца, с помощью пистолета (Иллюстрация 2).

Далее стержень погружался в заполненное отверстие клеем путем вдавливания с вращающим движением. Выступ клея должен составлять 2–3 мм, что обеспечивает достаточный объем клея и отсутствие пустот (Иллюстрация 3).

Далее, образцы оставляли в покое до достижения конструкцией прочности 70% при температуре $+23^\circ\text{C}$ в течение 7 дней. Излишки клея удалялись стамеской.

Приборы и оборудование

Эксперимент по выдерживанию стального стержня из бруса проводился на разрывной испытательной машине (Иллюстрация 4) в лаборатории кафедры строительных конструкций ТИУ. Прибор имеет максимальное усилие 50 кН и предназначен для проведения испытаний на растяжение. Машина оснащена электронным силовым измерителем — датчик силы, который крепится к подвижной траверсе.

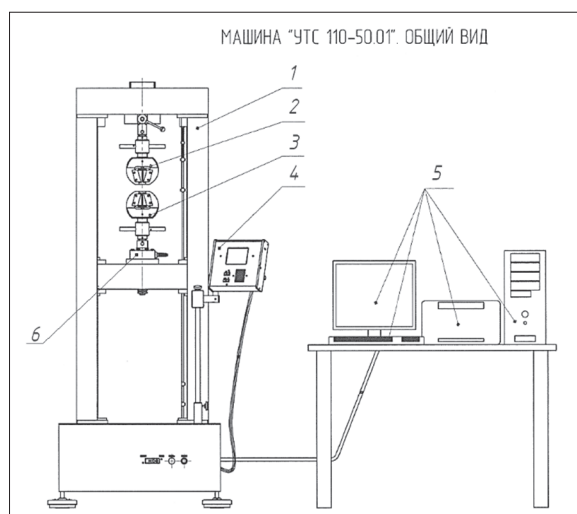


Иллюстрация 4. Схема испытательной машины: 1 — разрывная машина; 2, 3 — захваты; 4 — пульт управления; 5 — персональный компьютер. Авторы: С. А. Еренчинов, С. А. Минигалеева

Перед началом проведения лабораторного эксперимента подготовленный образец закреплялся в захватах машины. Для этого со стороны нижнего захвата использовалось разработанное нами крепление, состоящее из металлической пластины и болта. Данные элементы устанавливались в предварительно выполненные отверстия в деревянных брусках. Схема установки крепления представлена на Иллюстрации 5.

Общий вид сборки крепления для образцов показан на Иллюстрации 6.

Необходимые параметры для проведения испытания образца задавались с помощью операторного пульта. Ручное управление позволяет контролировать весь процесс нагружения.

При испытании на растяжение конструкция испытывала перемещения путем передачи на нее нагрузки через нижний захват, соединенный с подвижной траверсой. Все перемещения фиксировались датчиком силы.

Результаты испытания записывались программой «Металл» версии 3.1, установленной на подключенном к испытательному прибору персональном компьютере, и выдавались в виде графиков в координатах «Усилие — Перемещение» (Иллюстрация 7).

Методика проведения лабораторных исследований

Испытание образцов производилось по растянутой схеме до момента разрушения путем приложения кратковременной статической нагрузки.

Теоретическая несущая способность стального стержня, вклеенного вдоль волокон древесины, согласно [8] определяется по формуле

$$T = R_{\text{ск}}^A \cdot d_1 \cdot \pi \cdot l \cdot k_c \cdot m_{\text{дл}} \cdot P_{\text{ми}}, \quad (1)$$

где $R_{\text{ск}}^A$ — расчетное сопротивление древесины скалыванию, МПа, принимаемое равным 3,2 МПа как для древесины второго сорта;

d_1 — диаметр отверстия, м;

l — длина заделываемой части стержня, м, которую следует принимать по расчету, но не менее $10d$ и не более $30d$;

k_c — коэффициент, учитывающий неравномерность распределения напряжений сдвига в зависимости от длины заделываемой части стержня, определяется по формуле

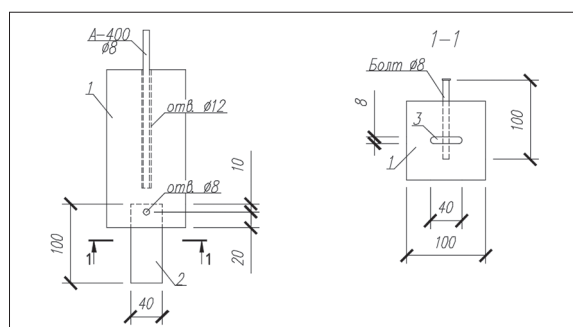


Иллюстрация 5. Схема установки крепления: 1 — деревянный брусок; 2 — стальная пластина; 3 — отверстие для пластины. Авторы: С. А. Еренчинов, С. А. Минигалеева

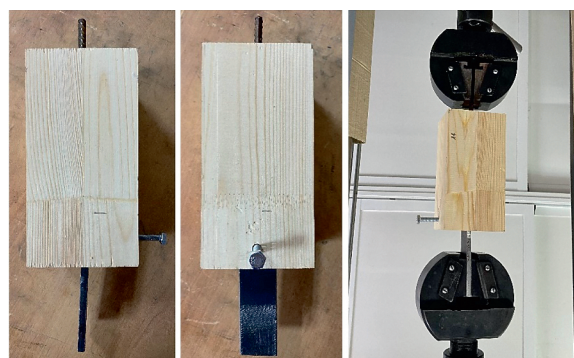


Иллюстрация 6. Общий вид крепления образца. Фото: С. А. Еренчинов, С. А. Минигалеева

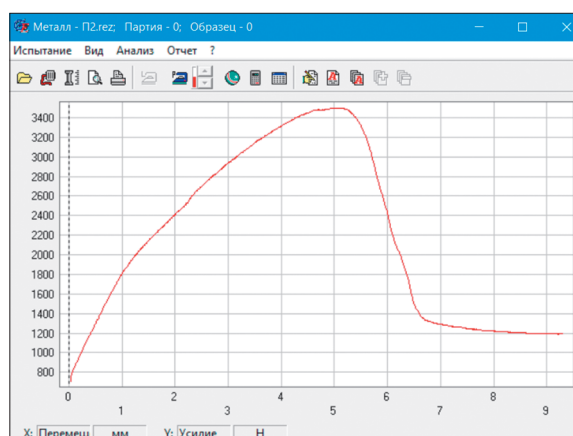


Иллюстрация 7. Вывод результатов испытания.

Авторы: С. А. Еренчинов, С. А. Минигалеева

$$k_c = 1,2 - 0,02 \cdot \frac{l}{d}; \quad (2)$$

$m_{\text{дл}}$ — коэффициент длительной прочности, соответствующий режиму длительности загрузки, принимаемый равным 1,0 как для линейно возрастающей нагрузки при стандартных машинных испытаниях;

$P_{\text{ми}}$ — произведение коэффициентов условий работы, множителем которого является коэффициент $m_b = 1,0$ при условии эксплуатации 2 (нормальный).

При заделываемой части стержня 150 мм и диаметре отверстия 12 мм теоретическое значение несущей способности образцов составило 20,91 кН.

Экспериментальное исследование проводится путем нагружения образцов ступенями величиной, принимаемой равной 8–10% от расчетного значения несущей способности соединения согласно рекомендациям [6]. Время выдержки одной ступени составляет 5 минут [5].

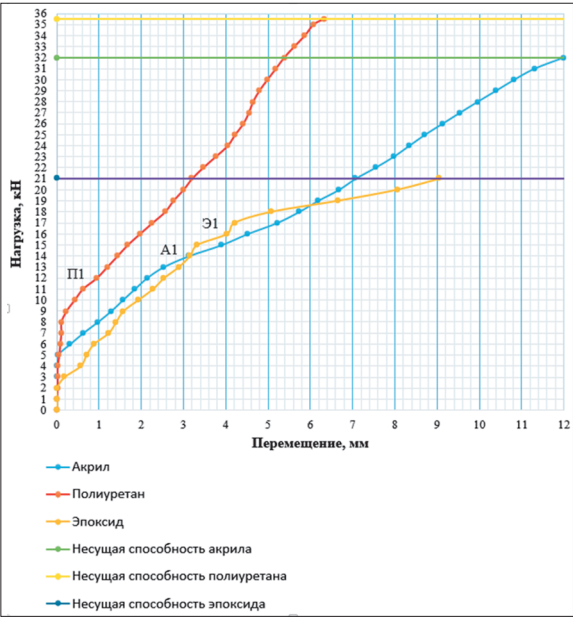


Иллюстрация 8. График зависимости перемещений от действующей нагрузки. Авторы: С. А. Еренчинов, С. А. Минигалеева



Иллюстрация 9. Величина выхода стального стержня из древесины на полиуретановом клее. Авторы: С. А. Еренчинов, С. А. Минигалеева



Иллюстрация 10. Выполнение наблюдений образца на полиуретановом клее. Авторы: С. А. Еренчинов, С. А. Минигалеева

Таблица 1. Полученные результаты испытываемых соединений

Сравнительная характеристика	Полиуретановый клей	Акриловый клей	Эпоксидный клей
Максимальная несущая способность клеевого соединения, кН	35,5	32,0	21,0
Перемещение стержня, мм	1,0	1,5	1,5

Обработка и оценка результатов лабораторных исследований

Результаты исследования для образцов с использованием акрилового и полиуретанового типов клеев получены в ходе проведения лабораторных испытаний. Данные исследований на выдергивание арматуры из массива древесины с использованием эпоксидного клея представлены на основе ранее проведенных другими исследователями аналогичных испытаний [3].

На Иллюстрации 8 приведен график работы стального стержня под нагрузкой, отображающий зависимость нагрузки P , кН, прикладываемой через домкрат, от перемещения стержня S , мм.

По диаграмме видно, что образец П1 имеет линейный характер работы до точки со значением нагрузки 8,0 кН. Далее наблюдается нелинейная зависимость, что означает наступление пластичной работы соединения. При достижении нагрузки в 35,5 кН происходит разрушение, и соответствующая величина деформаций составляет 6,32 мм.

Линейная зависимость упругой деформации кривой образца А1 прослеживается до точки, при которой величина нагрузки равна 5,0 кН. Дальнейшее нагружение говорит о переходе в пластичную стадию работы. Разрушение прослеживается при величине нагрузки, равной 32,0 кН и перемещении стержня равной 11,99 мм.

Для образца Э1 упругая работа присутствует до переломной точки, соответствующей нагрузке 2,0 кН. Об этом свидетельствует линейный участок кривой. Нелинейная часть работы соединения наблюдается до момента разрушения, при котором величина нагрузки составляет 21,0 кН, перемещение — 9,05 мм.

После разгрузки образца выполнялись замеры остаточных деформаций арматуры (Иллюстрация 9). Величина выхода стального стержня из древесины с использованием полиуретанового клея составила 1 мм, что соответствует максимальной несущей способности соединения.

Результаты испытаний для всех трех типов клея представлены в Таблице 1.

Для более точного описания характера разрушения конструкции образец раскалывался вдоль волокон и тщательно осматривался. На Иллюстрации 10 заметно выкалывание участков древесины вместе с клеевым швом и выдергивание клея с арматурным стержнем по древесине. Данные факторы указывают на хрупкость разрушаемого соединения.

Наличие адгезионного сцепления между клеящим составом и склеиваемыми материалами в исследуемом соединении позволяет последнему сопротивляться прикладываемой нагрузке при работе вклеенного арматурного стержня на растяжение. Разрушение образца наступило в результате потери удерживающей силы сцепления вследствие увеличения нагрузки.

Установлено, что максимальные перемещения арматурного стержня полностью зависят от прикладываемой к нему растягивающей силы. Также на несущую способность соединения влияет величина анкеровки: чем меньше величина погружения стержня в тело древесины, тем меньшую величину нагрузки соединение может выдержать.

Заключение

Полученные данные деревянных образцов на вклеенных стальных стержнях в результате выполненных лабораторных исследований на растяжение при кратковременной статической нагрузке подтверждают податливость соединения и позволяют сделать основные выводы.

- 1 Одним из важнейших факторов, влияющих на прочность клеевых соединений, является адгезионное взаимодействие. Потеря несущей способности соединения наступает в результате потери адгезионного сцепления склеиваемых материалов, на что указывает срыв арматуры и спад величины прикладываемого усилия.
- 2 В ходе испытаний получены результаты по трем типам клея: П1 — полиуретановый клей, выдержавший усилие в 35,5 кН, фактическое перемещение составило 1 мм; А1 — акриловый клей с максимальной несущей способностью 32,0 кН и остаточной деформацией 1,5 мм; Э1 — эпоксидный клей, имеющий максимальное воспринимающее усилие в 21,0 кН и деформацию 1,5 мм.
- 3 Получившаяся максимальная величина перемещения для всех трех образцов является предельно допустимой, так как удовлетворяет предъявляемому критерию несущей способности для клеевых соединений, равной 1,5 мм [8].
- 4 Полученные данные сравнительного анализа трех типов клея позволяют утверждать, что полиуретановый клей является эффективным, технологичным и достаточно прочным связующим для разработки данного типа соединений.

Список использованной литературы

- [1] Бобович Б. Б. Полимерные конструкционные материалы (структура, свойства, применение): учеб. пособие. — М.: Форум: Инфра-М, 2014. — 400 с.
- [2] Вылегжанин Ю. Б. Исследование работы соединений на клеенных в древесину стальных стержнях: автореф. дис. ... канд. техн. наук. — Новосибирск, 1980. — 18 с.
- [3] Есипов А. В., Еренчинов С. А., Черных К. В. Учет податливости клеевого соединения арматуры и древесины в армированных деревянных балках // Вестн. ПНИПУ. Прикладная экология. Урбанистика. — 2020. — № 4. — С. 29–40.
- [4] Кардашов Д. А., Петрова А. П. Полимерные клеи. Создание и применение. — М.: Химия, 1983. — 256 с.
- [5] Рекомендации по испытанию деревянных конструкций / ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. — М.: Стройиздат, 1976. — 28 с.
- [6] Рекомендации по испытанию соединений деревянных конструкций / ЦНИИСК им. В. А. Кучеренко. — М.: Стройиздат, 1980. — 40 с.
- [7] Турковский С. Б., Погорельцев А. А., Преображенская И. П. Клееные деревянные конструкции с узлами на клеенных стержнях в современном строительстве (система ЦНИИСК). — М.: РИФ «Стройматериалы», 2013. — 308 с.
- [8] СП 64.13330.2017 Деревянные конструкции. — М.: Министерство строительства и жилищно-коммунального хозяйства Российской Федерации, 2017. — 90 с.
- [9] ГОСТ 5781–82 Сталь горячекатаная для армирования железобетонных конструкций. Технические условия (с Изменениями № 1, 2, 3, 4, 5). — М.: Стандартинформ, 2009. — 10 с.
- [10] ГОСТ 10587–84. Смолы эпоксидно-диановые неотвержденные. Технические условия (с Изменением № 1). — М.: Изд-во стандартов, 1989. — 20 с.
- [11] ГОСТ Р 50096–2015 (ISO 4597–1:2005) Пластмассы. Отвердители и ускорители отверждения эпоксидных смол. Часть 1. Обозначения. — М.: Стандартинформ, 2016. — 7 с.

References

- [1] Bobovich B. B. Polimernye konstrukcionnye materialy (struktura, svojstva, primeneniye): ucheb. posobie. — M.: Forum: Infra-M, 2014. — 400 s.
- [2] Vylegzhanin Yu. B. Issledovanie raboty soedinenij na vkleennyh v drevesinu stal'nyh sterzhnyah: avtoref. dis. ... kand. tekhn. nauk. — Novosibirsk, 1980. — 18 s.
- [3] Esipov A. V., Erenchinov S. A., Chernyh K. V. Uchet podatlivosti kleeвого soedineniya armatury i drevesiny v armirovannyh derevyannyh balkah // Vestn. PNIPU. Prikladnaya ekologiya. Urbanistika. — 2020. — № 4. — S. 29–40.
- [4] Kardashov D. A., Petrova A. P. Polimernye klei. Sozdanie i primeneniye. — M.: Himiya, 1983. — 256 s.
- [5] Rekomendacii po ispytaniyu derevyannyh konstrukcij / CNIISK im. V. A. Kucherenko. — M.: Strojizdat, 1976. — 28 s.
- [6] Rekomendacii po ispytaniyu soedinenij derevyannyh konstrukcij / CNIISK im. V. A. Kucherenko. — M.: Strojizdat, 1980. — 40 s.
- [7] Turkovskij S. B., Pogorel'cev A. A., Preobrazhenskaya I. P. Kleenye derevyannye konstrukcii s uzlamy na vkleennyh sterzhnyah v sovremennom stroitel'stve (sistema CNIISK). — M.: RIF «Stroymaterialy», 2013. — 308 s.
- [8] SP 64.13330.2017 Derevyannye konstrukcii. — M.: Ministerstvo stroitel'stva i zhilishchno-kommunal'nogo hozyajstva Rossijskoj Federacii, 2017. — 90 s.
- [9] GOST 5781–82 Stal' goryachekatanaya dlya armirovaniya zhelezobetonnyh konstrukcij. Tekhnicheskie usloviya (s Izmeneniyami № 1, 2, 3, 4, 5). — M.: Standartinform, 2009. — 10 s.
- [10] GOST 10587–84. Smoly epoksidno-dianovye neotverzhdennye. Tekhnicheskie usloviya (s izmeneniyami № 1). — M.: Izd-vo standartov, 1989. — 20 s.
- [11] GOST R 50096–2015 (ISO 4597–1:2005) Plastmassy. Otverditeli i uskoriteli otverzhdeniya epoksidnyh smol. Chast' 1. Oboznacheniya. — M.: Standartinform, 2016. — 7 s.

Статья поступила в редакцию 14.06.2022.

Опубликована 30.12.2022.

Erenchinov Sergey A.

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor,
Tyumen Industrial University (TIU), Tyumen, Russian
Federation
e-mail: erenchinov@yandex.ru

Minigaleeva Snezhana A.

Master's Degree, Tyumen Industrial University (TIU),
Tyumen, Russian Federation
e-mail: minigaleeva.s@yandex.ru