

На правах рукописи



Хаббатуллин Роман Радикович

Повышение эффективности фрезерования использованием бездеформационного закрепления заготовок полимерными нанокомпозициями

Специальность 2.5.5. Технология и оборудование механической и физико-технической обработки

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Москва – 2024

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет)» (МГТУ им. Н.Э. Баумана).

Научный руководитель: Кононенко Александр Сергеевич,
доктор технических наук, доцент

Официальные оппоненты: Баурова Наталья Ивановна,
доктор технических наук, профессор,
ФГБОУ ВО «МАДИ», декан факультета
дорожных и технологических машин,
профессор кафедры «Производство и ремонт
автомобилей и дорожных машин»

Исаев Александр Вячеславович,
кандидат технических наук, доцент,
ФГБОУ ВО «МГТУ «СТАНКИН», доцент
кафедры инструментальной техники
и технологии формообразования

Ведущая организация: Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение высшего
образования «Липецкий государственный
технический университет»

Защита диссертации состоится «___» 2024 г. в ___ часов
на заседании диссертационного совета 24.2.331.02 при Московском государственном
техническом университете имени Н.Э. Баумана по адресу: 105005, Москва,
2-я Бауманская ул., д. 5, стр. 1.

Телефон для справок 8 (499) 263-66-33, доб. 3628.

Ваш отзыв на автореферат в двух экземплярах, заверенных печатью организаций, просим направлять на имя ученого секретаря Диссертационного Совета по указанному адресу.

С диссертацией можно ознакомиться в научно-технической библиотеке
Московского государственного технического университета имени Н.Э. Баумана,
на сайте www.bmstu.ru.

Автореферат разослан «___» 2024 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета 24.2.331.02
кандидат технических наук, доцент



А.В. Богданов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы исследования. Основными причинами возникновения погрешностей обработки на металлорежущих станках являются недостаточная точность и жесткость оборудования, неточность изготовления и недостаточная жесткость режущего и вспомогательного инструмента, погрешности базирования и закрепления приспособления и заготовки при неверном выборе комплектов технологических баз на станке, деформации при зажиме или под действием нагрева и сил резания, погрешности в процессе измерения.

Нивелировать или свести к минимуму влияние и значение некоторых из перечисленных погрешностей позволяет применение металлорежущих станков с ЧПУ и высокоточной технологической оснастки. Более высокая точность при обработке заготовок на станках с ЧПУ по сравнению с точностью при обработке на станках с ручным управлением достигается благодаря уменьшению влияния «человеческого фактора». Тем не менее сохраняются неблагоприятные факторы, на которые система с ЧПУ не способна повлиять. К таким факторам относятся процесс базирования и закрепления заготовок в рабочей зоне станка.

При изготовлении деталей важными являются правильность решения задач закрепления заготовок в рабочей зоне станка с ЧПУ, а также выбор приспособления и его параметров для закрепления. Процесс базирования и закрепления заготовок усложняется при изготовлении корпусных деталей из-за многообразия геометрических форм элементов, неравномерности жесткости готового изделия, больших габаритных размеров и различий в требованиях к точности.

Проведенный анализ показал, что корпусные детали составляют 27% от общего количества деталей в машиностроении, при этом трудоемкость их обработки составляет около 60% от общей трудоемкости.

При единичном и мелкосерийном производстве для фрезерной обработки корпусных деталей оптимальным решением является использование фрезерных станков с ЧПУ, оснащенных поворотным столом с точным позиционированием. При обработке заготовок на таком оборудовании выбор способа закрепления имеет важное значение, поскольку крепление не должно затруднять доступ к обрабатываемым поверхностям и при этом оно должно обеспечивать возможность обработки всех ответственных элементов за один установ.

Закрепление заготовки на рабочем столе фрезерного станка можно осуществлять через пластины, зажатую в тисках, к которой посредством использования полимеров крепится заготовка. Модифицирование полимерных составов наполнителями позволяет преодолеть такие недостатки полимеров, как невысокие упругие и прочностные свойства, относительно низкую стойкость к вибрационным нагрузкам. В результате можно значительно повысить эксплуатационные и механические характеристики полимерных составов.

Таким образом, работа, посвященная повышению эффективности изготовления корпусных деталей на станках с ЧПУ, заключающейся в увеличении производительности и снижении себестоимости за счет применения бездефор-

мационного закрепления заготовок с помощью полимерных нанокомпозиций, является весьма актуальной.

Степень разработанности темы исследования. Вопросами совершенствования технологии механической обработки на металлорежущих станках занимались Авраменко В.Е., Аврутин С.В., Базров Б.М., Грубый С.В., Диланян К.Р., Зимин В.В., Кондаков А.И., Корсаков В.С., Кургузов Ю.И., Пономарев В.А. и другие ученые. Улучшению свойств полимерных материалов и совершенствованию технологии их применения посвящены труды Бауровой Н.И., Кононенко А.С., Котина А.В., Курчаткина В.В., Ли Р.И. и других ученых. Однако в их трудах не были исследованы вопросы, связанные с применением полимерных материалов для закрепления заготовок при обработке резанием.

Целью работы является повышение эффективности фрезерования с использованием бездеформационного закрепления заготовок полимерными нанокомпозициями.

Задачи исследований:

1. Разработать математическую модель, определяющую эквивалентные напряжения и деформацию в клеевом слое от действия сил резания и геометрических параметров заготовки.
2. Разработать нанокомпозиции на основе полимерных клеев, обладающие максимальными прочностными характеристиками.
3. Исследовать адгезию полимерных нанокомпозиций с различными материалами заготовок.
4. Исследовать влияние наномодификаторов на скорость полимеризации составов, а также воздействие эксплуатационных факторов и термического воздействия на прочность полимерных клеев и нанокомпозиций на их основе.
5. Проанализироватьnanoструктуру полимерных составов.
6. Разработать способ бездеформационного закрепления заготовок с использованием полимерных нанокомпозиций.
7. Внедрить предложенный способ на профильных промышленных предприятиях и оценить его эффективность.

Научная новизна:

1. Разработана математическая модель, определяющая эквивалентные напряжения и деформацию в клеевом слое от действия сил резания и геометрических размеров заготовки.
2. Теоретически обосновано и экспериментально определено влияние вибрационных нагрузок, температуры и времени полимеризации на адгезионную прочность клея при бездеформационном закреплении заготовок.
3. Получено теоретическое условие применимости бездеформационного закрепления заготовки на полимерном клее, реализованное в виде расчетной программы.

Практическая значимость:

1. Разработан способ бездеформационного закрепления заготовок для механической обработки (патент РФ на изобретение № 2796031), позволяющий

при фрезеровании нежестких заготовок снизить стоимость операции их закрепления и время механической обработки.

2. Определен оптимальный состав полимерной нанокомпозиции на основе цианоакрилатного клея, обладающий повышенными прочностными, технологическими и эксплуатационными характеристиками.

3. Разработаны рекомендации по практическому использованию нанонаполненных полимерных составов и сконструирована специализированная оснастка для бездеформационного закрепления заготовок.

4. Разработана методика и расчетная программа для принятия решения о применимости способа закрепления при конкретных геометрических параметрах заготовки и режимах фрезерования.

Результаты диссертационной работы нашли практическое применение на предприятиях АО «МПП имени В.В. Чернышева», АО «Российские космические системы» и АО «Протон-ПМ».

Соответствие паспорту научной специальности. Область исследования соответствует пунктам паспорта специальности 2.5.5 – «Технология и оборудование механической и физико-технической обработки»: п. 3. «Исследование механических и физико-технических процессов в целях определения параметров оборудования, агрегатов, механизмов и других комплектующих, обеспечивающих выполнение заданных технологических операций и повышение производительности, качества, экологичности и экономичности обработки», п. 4. «Создание, включая проектирование, расчеты и оптимизацию, параметров рабочего инструмента и других компонентов оборудования, обеспечивающих технически и экономически эффективные процессы обработки».

Положения, выносимые на защиту:

1. Полученная математическая модель определяет эквивалентные напряжения и деформацию в клеевом слое от действия сил резания и геометрических параметров заготовки.

2. Вибрационные нагрузки, температура и время полимеризации оказывают наибольшее влияние на адгезионную прочность разработанного полимерного состава при бездеформационном закреплении заготовки.

3. Прочность клеевого соединения будет достаточной при выполнении условия, учитывающего влияние технологических и геометрических параметров бездеформационного закрепления и обработки заготовки.

Методы исследования и степень достоверности результатов. Теоретические исследования проведены с использованием основных положений технологии машиностроения, теорий упругости и сопротивления материалов. Для решения задач компьютерного моделирования использовались среды Autodesk Inventor и ANSYS Workbench. Планирование эксперимента проводили с использованием системы Statgraphics Centurion 19 фирмы Manugistics. При проведении экспериментальных исследований использованы стандартные методики и современное высокотехнологичное аттестованное оборудование: гидравлическая разрывная машина INSTRON 600DX, фрезерный станок с ЧПУ DMG DMU 50 Ecoline, лабораторные аналитические весы ВЛ-124, профилограф-

профилометр SJ-210, сканирующий зондовый микроскоп Solver NEXT, координатно-измерительная машина (далее – КИМ) с ЧПУ CRYSTA-APEX S574, вибростенд инерционного действия на базе эксцентрикового вибратора ИВ-107. Достоверность результатов экспериментов, обработанных с использованием современных методов статистического анализа данных, подтверждается достаточной повторяемостью полученных значений физико-механических характеристик нанокомпозиций, а также результатами практических испытаний и производственного внедрения способа бездеформационного закрепления заготовок полимерными нанокомпозициями.

Апробация результатов работы. Основные положения диссертации должны и обсуждены на научных семинарах кафедры технологии обработки материалов МГТУ им. Н.Э. Баумана (Москва, 2020–2023); Международной конференции «Моделирование в инженерном деле» (Москва, 2023); 6-й Международной конференции по Интеллектуальным вычислениям и оптимизации (Хуахин, Таиланд, 2023) – 6th International Conference on Intelligent Computing & Optimization 2023 (Hua Hin, Thailand, 2023); Международной научно-технической конференции «Иновационные технологии, оборудование и материалы заготовительных производств в машиностроении» (Москва, 2022); Международной научно-практической конференции «Инфокоммуникационные и интеллектуальные технологии на транспорте» (Липецк, 2022); XII Национальной научно-технической конференции, проводимой под эгидой Союза машиностроителей России (Москва, 2022); Конкурсе 2022 года на присуждение премии Мэра г. Москвы «Новатор Москвы» по направлению «Промышленность» (Москва, 2022); Всероссийском конкурсе научно-исследовательских работ в области инженерных и гуманитарных наук, посвященный 170-летию В.Г. Шухова в номинации «Технология машиностроения» (Москва, 2023); Конкурсе 2023 года на присуждение премии Мэра г. Москвы «Новатор Москвы» по направлению «Промышленность» (Москва, 2023).

Публикации. По материалам диссертации опубликованы 9 научных работ, в том числе 2 публикации в изданиях, включенных в систему цитирования Scopus, 5 публикаций в рецензируемых научных изданиях из перечня ВАК Минобрнауки, из них один патент на изобретение. Общий объем публикаций составляет 7,33 п.л., автору принадлежит 3,31 п.л.

Личный вклад. Все результаты диссертационной работы получены лично автором и при его непосредственном участии в результате проведения экспериментальных и расчетных работ. Во всех необходимых случаях заимствования результатов в диссертации приведены ссылки на литературные источники.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, пяти глав, общих выводов и заключения, списка литературы и приложений. Общий объем диссертации составляет 182 страницы машинописного текста, в том числе 170 страниц основного текста, 75 рисунков и 12 таблиц. Диссертация содержит список литературы из 219 наименований.

Содержание работы

Во введении обоснована актуальность темы, указаны цель работы, научная новизна, практическая значимость работы, сведения об апробации результатов работы и публикациях.

В Главе 1 приведен литературный обзор, посвященный анализу погрешностей, возникающих при механической обработке. Здесь с учетом существующих способов установки и обработки заготовки в рабочей зоне станка и необходимости уменьшения погрешности обработки рассмотрены способы установки и закрепления заготовок при фрезерной обработке на станках с ЧПУ, современные станочные приспособления, а также бездеформационные способы закрепления заготовок на магнитной и вакуумной плитах, их преимущества и недостатки.

Оценка влияния способа закрепления на точностные параметры деталей показала, что закрепление на полимерный состав обеспечивает существенное снижение составляющих погрешности установки. При закреплении заготовки по измерительной базе погрешность базирования стремится к нулю. Погрешность закрепления также стремится к нулю ввиду отсутствия контактных деформаций стыка заготовка–приспособление. Погрешность приспособления определяется точностью плиты, к которой приклеивается заготовка.

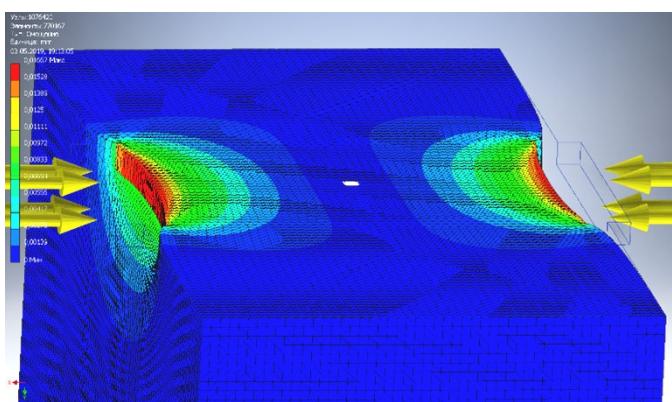


Рисунок 1.
Результаты анализа деформации
заготовки от сил зажима

Приведен анализ деформирующих зажимных сил (Рисунок 1), который показал, что при силе зажима, равной 40 кН, в закрепляемой заготовке возникают двусторонние деформации от каждой из губок тисков. Максимальное смещение в плоскости, параллельной приложенной силе составило более 0,016 мм на сторону. Результирующая деформация заготовки от действия сил зажима составила более 0,03 мм.

Силы зажима приводят к внутренним напряжениям и пластическим деформациям заготовки, поэтому для ее закрепления целесообразно применение полимерных клеев, разнообразие ассортимента которых позволяет подобрать требуемый состав для конкретных условий механической обработки и материала заготовки. Поскольку стоимость механической обработки во многом определяется временем работы оборудования, целесообразно применять полимерные составы с высокой скоростью полимеризации, к которым относятся цианоакрилатные клеи, обладающие высокими значениями адгезионной прочности. Анализ показал, что наиболее полной теорией, описывающей адгезионное взаимодействие системы «полимер – субстрат», является адсорбционная теория адгезии.

На основании проведенного литературного обзора были сформулированы цель и задачи исследования.

В Главе 2 определены зависимости напряжений, возникающих в полимерном составе от сил резания, для выявления применимости клеящего состава, используемого при бездеформационном закреплении обрабатываемых заготовок. Рассмотрена работоспособность по основным критериям: прочность, жесткость, вибростойкость, теплостойкость и стойкость к воздействию смазочно-охлаждающих технологических сред (далее – СОТС).

Вибростойкость и теплостойкость приспособления для бездеформационного закрепления заготовки определяются свойствами полимерного состава, поэтому для корректного учета влияния данных факторов при расчете прочности приспособления введены соответствующие коэффициенты $K_{\text{в}}$ и $K_{\text{т}}$, численные значения которых экспериментально определены в настоящей работе. Стойкость полимерной прослойки к воздействию СОТС высока ввиду малой площади их контакта. Простой оборудования при механической обработке существенно влияет на себестоимость конечного изделия, поэтому для учета необходимого времени полимеризации состава введен коэффициент $K_{\text{п}}$, также определяемый экспериментально для конкретного полимерного состава.

Достаточная прочность закрепления будет обеспечена в случае, если сила резания (F_p) будет меньше фактической силы ее закрепления (F_3):

$$K_3 F_p < F_3 = \sigma_3 S_p, \quad (1)$$

где $K_3 = 3,0\text{--}3,9$ – коэффициент запаса прочности при использовании бездеформационного закрепления заготовки на полимерный материал; F_p – сила резания при фрезеровании; F_3 – сила закрепления заготовки на полимерный клей; σ_3 – эквивалентные напряжения в полимерном слое; S_p – площадь полимерного слоя, воспринимающая растягивающие нагрузки.

Для оценки прочности соединения определяли эквивалентные напряжения в соответствии с энергетической гипотезой прочности по формуле

$$\sigma_3 = \sqrt{\sigma_{\Sigma}^2 + 3\tau_{\Sigma}^2} \leq [\sigma] = \sigma_{\text{п}} K_{\text{т}} K_{\text{в}} K_{\text{п}}, \quad (2)$$

где σ_{Σ} – суммарные нормальные напряжения, МПа; τ_{Σ} – суммарные касательные напряжения, МПа; $\sigma_{\text{п}}$ – предел прочности используемого клея, МПа.

Для определения нормальных напряжений, возникающих в слое полимера, сила F_p раскладывается на составляющие P_x , P_y и P_z (Рисунок 2). Осевая составляющая P_x вызывает напряжения сжатия, а силы P_y и P_z , действующие в горизонтальной плоскости, нагружают слой полимера изгибными и сжимающими напряжениями. Для удобства рассмотрения действия сил, находящихся в горизонтальной плоскости, целесообразно их преобразовать в продольную (силу подачи) и поперечную составляющие P_h и P_v соответственно. Эти силы в полимерном слое вызывают нормальные напряжения изгиба и касательные напряжения сдвига, а также соответствующие моменты M_h и M_v в сечении, где происходит приклеивание, которые рассчитываются согласно выражениям

$$M_v = P_v h; M_h = P_h h. \quad (3)$$

Нормальные напряжения σ_x , σ_v и σ_h от силы F_p определяются так:

$$\sigma_x = \frac{P_x}{S_{\pi}}; \quad \sigma_v = \frac{M_v}{W_v}; \quad \sigma_h = \frac{M_h}{W_h}, \quad (4)$$

где W_v, W_h – моменты сопротивления сечений в плоскости приложения сил.

Моменты сопротивления W_v и W_h определяются согласно выражениям

$$W_v = \frac{I_v}{h_{max}}; \quad W_h = \frac{I_h}{v_{max}}, \quad (5)$$

где I_v, I_h – моменты инерции относительно осей v, h , см⁴;

h_{max}, v_{max} – наиболее удаленные точки от цента сечения, см.

Момент инерции для сечения, по которому происходит при克莱ивание, определяется по формулам

$$I_v = \int_{\Phi} h^2 dA, \quad I_h = \int_{\Phi} v^2 dA, \quad (6)$$

где Φ – геометрическая фигура;

dA – площадь элементарной площадки, см².

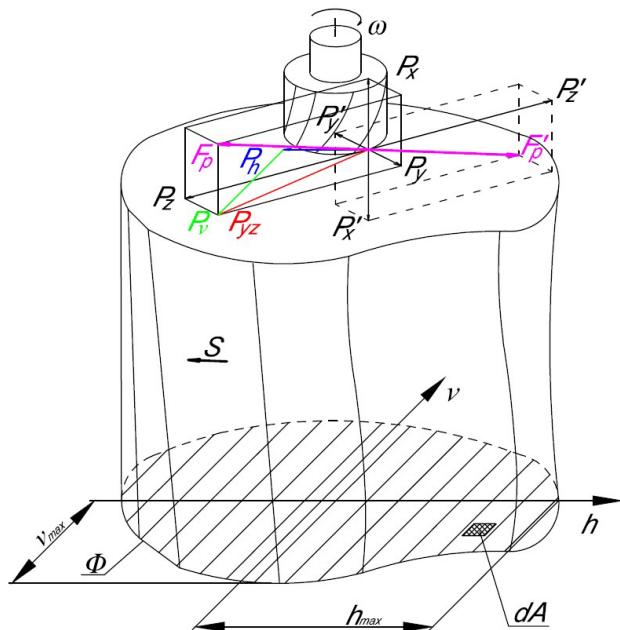


Рисунок 2.

Схема определения сил при фрезерной обработке заготовки произвольного сечения, закрепленной с помощью полимерной нанокомпозиции:

P_x, P_y и P_z – осевая, радиальная и тангенциальная составляющие силы резания;

P_{yz} – результирующая сила P_y, P_z ; P_h и P_v – продольная (сила подачи) и поперечная составляющие силы P_{yz} ; P'_x, P'_y, P'_z – соответствующие реакции составляющих сил резания; S – подача заготовки

Касательные напряжения, вызванные силами P_v и P_h в сечении, в котором происходит при克莱ивание, составят

$$\tau_h = \frac{P_h}{S_{\pi}}; \quad \tau_v = \frac{P_v}{S_{\pi}}. \quad (7)$$

После подстановки выражений для нормальных и касательных напряжений в формулу (2) условие применимости бездеформационного закрепления заготовки на полимерном клее в общем случае будет иметь следующий вид:

$$\sigma_{\pi} K_t K_b K_{\pi} > \sqrt{\left(\frac{P_x}{S_{\pi}}\right)^2 + \left(\frac{P_v h h_{max}}{\int_{\Phi} h^2 dA}\right)^2 + \left(\frac{P_h h v_{max}}{\int_{\Phi} v^2 dA}\right)^2 + 3 \left(\frac{\sqrt{P_v^2 + P_h^2}}{S_{\pi}}\right)^2} K_3. \quad (8)$$

Была решена также задача для частного случая закрепления заготовки, имеющей форму прямоугольного параллелепипеда и обрабатываемой на фрезерном станке торцовой фрезой (Рисунок 3).

Если пренебречь нормальными напряжениями сжатия, суммарные нормальные напряжения, согласно теореме Пифагора, можно найти по формуле

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\sigma_h^2 + \sigma_{\Sigma v}^2}, \quad (9)$$

где σ_h – максимальные нормальные напряжения в продольной плоскости, МПа; $\sigma_{\Sigma v}$ – максимальные нормальные напряжения в поперечной плоскости, МПа.

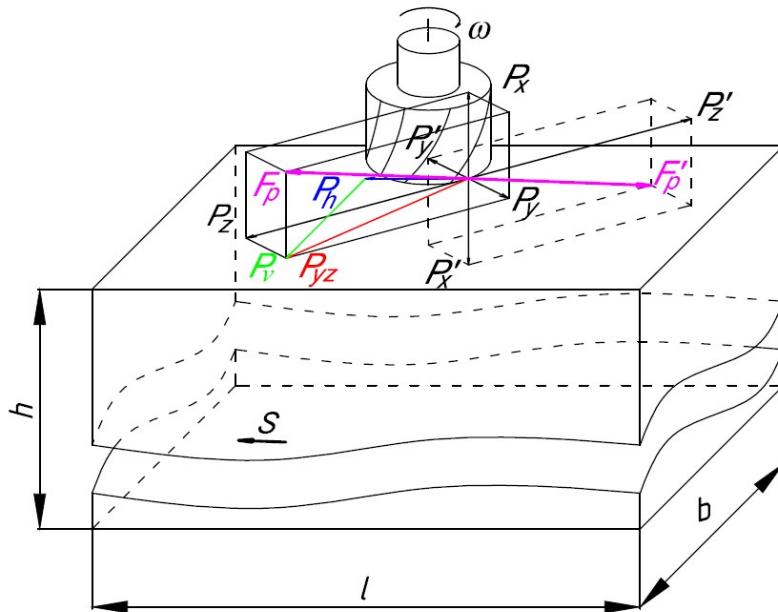


Рисунок 3.

Схема определения сил при фрезерной обработке заготовки прямоугольного сечения, закрепленной с помощью полимерной нанокомпозиции

С учетом допущения о линейном распределении нормальных напряжений в клеевом слое максимальные нормальные напряжения в продольной σ_h и поперечной σ_v плоскостях будут возникать у основания заготовки (в клеевом шве) от соответствующих сил P_h и P_v , находящихся на максимальном удалении от стола (габаритная высота h), и будут рассчитываться так:

$$\sigma_h = \frac{M_h}{W_v}; \sigma_v = \frac{M_v}{W_h}, \quad (10)$$

где M_h, M_v – изгибающие моменты от действия сил P_h и P_v соответственно, Н·м; W_h, W_v – моменты сопротивления в продольном и поперечном направлениях, см³.

$$M_h = P_h h; \quad M_v = P_v h, \quad (11)$$

где P_h, P_v – продольная и поперечная составляющие силы резания; h – габаритная высота заготовки.

Моменты сопротивления определяются по формулам

$$W_h = \frac{l^2 b}{6}; \quad W_v = \frac{b^2 l}{6}. \quad (12)$$

Преобразовав совместно выражения (9)–(12), получим

$$\sigma_{\Sigma} = \sqrt{\left(\frac{6P_h h}{l^2 b}\right)^2 + \left(\frac{6P_v h}{b^2 l}\right)^2}. \quad (13)$$

Суммарные касательные напряжения находятся по теореме Пифагора:

$$\tau_{\Sigma} = \sqrt{\tau_h^2 + \tau_v^2}. \quad (14)$$

Касательные напряжения сдвига в продольном и поперечном направлениях определяются по формулам

$$\tau_h = \frac{P_h}{lb}, \quad \tau_v = \frac{P_v}{lb}. \quad (15)$$

Допустив равномерность распределения касательных напряжений по ширине сечения, получим

$$\tau_{\Sigma} = \sqrt{\left(\frac{P_h}{lb}\right)^2 + \left(\frac{P_v}{lb}\right)^2}. \quad (16)$$

С учетом допущений, рассмотрев нормальные и касательные напряжения, было определено условие применимости бездеформационного закрепления заготовки длиной l , шириной b и высотой h при ее обработке торцовой фрезой:

$$\sigma_{\Pi} K_T K_B K_{\Pi} > \sqrt{\left(\frac{6P_h h}{l^2 b}\right)^2 + \left(\frac{6P_v h}{b^2 l}\right)^2 + 3 \left[\left(\frac{P_h}{lb}\right)^2 + \left(\frac{P_v}{lb}\right)^2 \right] K_3}. \quad (17)$$

Моделирование напряженного состояния заготовки под действием статической силы резания методом конечных элементов в программном обеспечении на базе CAD/CAE-системы Autodesk Inventor показало, что значения максимальных напряжений при моделировании получились меньше, чем при расчете по полученному выражению в среднем на 4%.

Для оценки применимости и корректировки технологии изготовления деталей при бездеформационном закреплении заготовок на полимерный состав разработана компьютерная программа, позволяющая получать значения параметров режимов резания в зависимости от характеристик инструмента, заготовки и клея.

Была исследована жесткость полимерного состава и получена формула для вычисления линейной деформации в наиболее нагруженной и условно менее жесткой поперечной плоскости:

$$\delta h_v = \frac{6P_v h \delta}{E b^2 l - 6P_v h}. \quad (18)$$

Анализ деформации полимерного слоя в заготовке с размерами сторон $0,1 \times 0,1 \times 0,1$ м под действием составляющей силы резания P_v , изменяющейся в диапазоне от 500 до 20 000 Н, показал, что деформация является пренебрежимо малой и не превышает 0,34 мкм.

В Главе 3 изложена общая программа и частные методики исследования оптимальной концентрации нанонаполнителей, влияния размера наночастиц на прочность полимерных композиций и скорость их полимеризации, температурной стойкости полимерных составов и их адгезии с различными материалами, стойкости полимерных композиций к воздействию СОТС и вибрационным нагрузкам, а также наноструктуры поверхностей полимеров.

Анализ рынка цианоакрилатных составов показал, что отечественные предприятия машиностроительной отрасли широко используют клеи производства АО «НИИ ПОЛИМЕРОВ» (ТК-200, ТК-300, ТК-301) и зарубежные клеи фирмы Loctite (Loctite 496, Loctite 415, Loctite 420). Наилучшие характеристики для закрепления заготовок имеют клеи ТК-200 и Loctite 496, поэтому их использовали для исследований. По итогам анализа свойств наполнителей для исследований применяли наноразмерные диоксид кремния (далее – SiO_2), оксид алюминия (далее – Al_2O_3) и углеродные нанотрубки (далее – УНТ).

По формуле Коунто определили, что массовая концентрация SiO_2 в исследуемых полимерных составах составляет от 1,5 до 2,5%, Al_2O_3 – от 0,4 до 0,8% и УНТ – от 0,3 до 0,6%; при проведении экспериментов исследовались нанокомпозиции с данным диапазоном концентраций наночастиц:

$$\frac{E_{\text{нк}}}{E_{\text{п}}} = \left(1 - \varphi_{\text{н}}^{1/2}\right) + \frac{\frac{E_{\text{н}}}{(1 - \varphi_{\text{н}}^{1/2})}}{\frac{\varphi_{\text{н}}^{1/2}}{E_{\text{п}} + E_{\text{н}}}}, \quad (19)$$

где $E_{\text{нк}}$, $E_{\text{п}}$ и $E_{\text{н}}$ – модули упругости композиций, ненаполненного полимера и наполнителя соответственно, МПа; $\varphi_{\text{н}}$ – объемная доля наполнителя.

Адгезионную прочность полимерных составов и нанокомпозиций на их основе оценивали по значениям нормальных и касательных напряжений при отрыве и сдвиге склеенных образцов на гидравлической разрывной машине INSTRON 600 DX. Перед началом испытаний нанокомпозиции обрабатывались ультразвуком, поверхности образцов очищали и обезжиривали ацетоном. С помощью программного пакета Statgraphics Centurion 19 проводился факторный анализ экспериментальных данных и получен оптимальный состав нанокомпозиций.

Влияние материала заготовок на адгезионную прочность исследуемых полимеров оценивали для образцов из БрОЦС5-5-5, Л63, В95Т1, АМГ6, Д16Т, ПН Ф4, ПОМ С и ПА 6, а также осуществляли оценку влияния размера частиц нанопорошка SiO_2 на адгезионные свойства Loctite 496 и ТК-200.

Для определения влияния температурного воздействия на прочность клеевого соединения образцы подвергались термическому воздействию в течение 20 мин при температурах от 40 до 160°C. Оценка адгезионной прочности проводилась по нормальным и касательным напряжениям.

Стойкость полимерных составов к воздействию СОТС оценивалась по изменению массы полимерных пленок размером $0,1 \times 15 \times 15$ мм, изготовленных в соответствии с требованиями ГОСТ 269-66. После кондиционирования, согласно ГОСТ 12423-66, их взвешивали на весах ВЛ-124 с точностью 10^{-4} г. После выдержки пленок в воде, масляной СОЖ и СОЖ в концентрации 5% в течение 1–672 ч их очищали, просушивали и кондиционировали. Относительное изменение массы образцов определяли по соотношению их масс до и после выдержки.

Вибрационную стойкость исследуемых составов оценивали по их адгезионной прочности после воздействия вибраций в течение 10, 20 и 30 ч на стенде с эксцентриковым вибратором ИВ-107.

Влияние наноразмерных частиц на скорость набора прочности нанонаполненных полимеров определяли путем проведения сравнительных испытаний со-

ставов Loctite 496, ТК-200 и нанокомпозиций на их основе. Адгезионную прочность исследовали в диапазоне 5 с – 24 ч после склеивания образцов.

Наноструктуру образцов оценивали с помощью сканирующего зондового микроскопа Solver NEXT. Образцами служили квадратные пленки из полимеров и нанокомпозиций размером 5,0×5,0 мм и толщиной 0,05 мм.

В Главе 4 описаны результаты исследований и проведен их анализ. Модификация цианоакрилатных полимеров наночастицами приводит к увеличению прочности нанокомпозиции. Для определения оптимальной концентрации нанонаполнителей использовался двухфакторный центральный композиционный анализ. Результаты исследований (Рисунок 4) показали, что максимальное значение адгезионной прочности полимерной композиции на основе ТК-200 достигается при размере частиц наполнителя 380 нм и массовой концентрации 2%. Аналогичные результаты получены при исследовании Loctite 496. В этой связи для дальнейших исследований был выбран наполнитель диоксид кремния Аэросил HL 380.

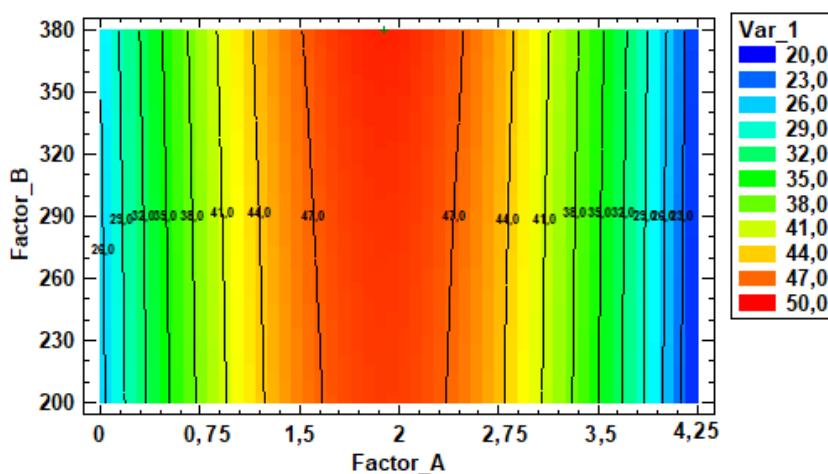


Рисунок 4.

Контурный график совместного влияния размера частиц (Factor_B) и массовой концентрации (Factor_A) на адгезионную прочность (Var_1) полимерной композиции на основе ТК-200

Исследования температурной стойкости полимеров показали, что снижение прочности состава Loctite 496 и нанокомпозиции на его основе происходит при нагреве до температур 80 и 100 °С соответственно, а ТК-200 и нанокомпозиции на его основе – при нагреве соответственно до 100 и 120 °С. Повышение стойкости нанокомпозиций к воздействию высоких температур составило 15–20 °С, что, скорее всего, связано с более высокой теплостойкостью нанонаполнителя. Были определены значения коэффициента K_t для выражения (17).

Результаты исследования адгезии исследуемых составов Loctite 496 и ТК-200 с различными материалами заготовок представлены на Рисунке 5. Адгезионная прочность на отрыв разработанной нанокомпозиции на основе ТК-200 с образцами из стали 45 составила 46,3 МПа, из алюминиевых сплавов В95Т1, АМГ6 и Д16Т – 40,9 – 45,0 МПа, из бронзы (БрОЦС5-5-5) и латуни (Л63) соот-

ветственно 53,5 и 47,1 МПа, из фторопласта (ПН Ф4), полиацетали (ПОМ С) и полиамида (ПА6) – 11,5–14,4 МПа. Прочность по касательным напряжениям этой же композиции к образцам из стали 45 составила 18,8 МПа, из алюминиевых сплавов – 18,5–20,0 МПа, из бронзы и латуни – соответственно 25,0 и 20,3 МПа, а из фторопласта, полиацетали и полиамида – 4,9–6,6 МПа. Влияние материала субстрата на адгезионную прочность нанокомпозиции на основе Loctite 496 носит аналогичный характер.

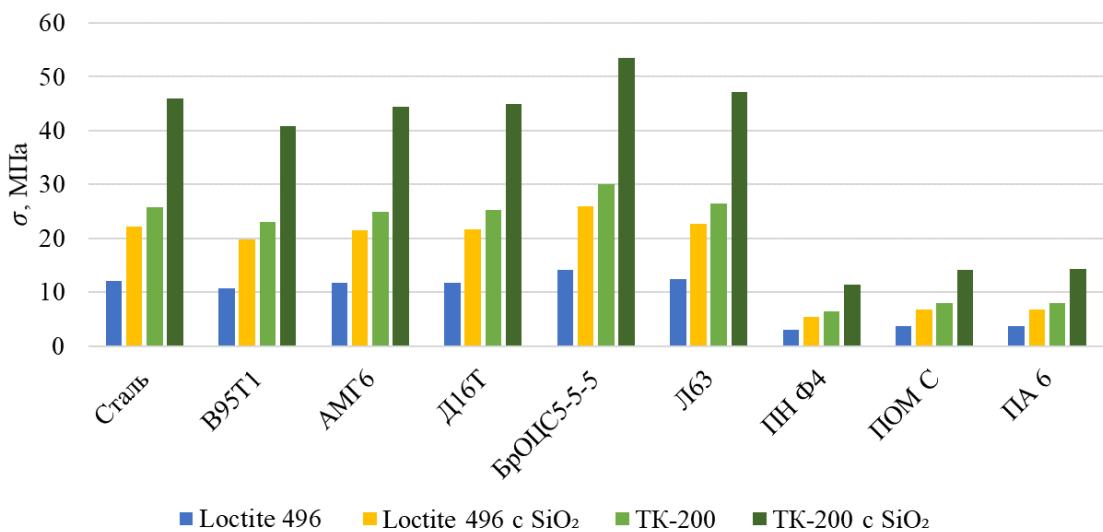


Рисунок 5.
Адгезионная прочность Loctite 496, TK-200 и нанокомпозиций на их основе с различными материалами

Анализ результатов исследования стойкости полимеров к СОТС показал, что цианоакрилатные клеи имеют высокую стойкость во всех исследуемых средах. Добавление наночастиц SiO₂ позволяет уменьшить влияние агрессивных сред на составы TK-200 и Loctite 496 до 63%.

Вибрационное воздействие на полимер показало, что через 30 ч значение адгезионной прочности состава TK-200 снизилось на 11%, Loctite 496 – на 17%, а нанокомпозиций на основе TK-200 и Loctite 496 – соответственно на 7 и 14%. Полученные результаты показали, что у нанокомпозиций стойкость к вибрационным нагрузкам до 37% больше, чем у ненаполненных составов. Стойкость к вибрационным нагрузкам у нанокомпозиции с отечественным составом выше, чем с зарубежным. Были определены значения коэффициента K_B для выражения (17).

Результаты оценки адгезии по нормальным напряжениям через 10–300 с показали, что скорость набора прочности полимерных составов Loctite 496 и TK-200 увеличивается при добавлении наноразмерных частиц диоксида кремния соответственно в 1,5 и 1,45 раза. В результате чего наномодификация полимера позволяет за существенно более короткий промежуток времени достичь сопоставимых значений прочности. Так, время набора прочности нанокомпозиции на основе TK-200 до 26 МПа составляет 90 с, что в 2 раза меньше, чем для ненаполненного состава,

который приобретает ту же прочность лишь через 180 с. Также по результатам эксперимента были определены значения коэффициента K_{Π} для выражения (17).

Результаты микроскопии полимера TK-200 (Рисунок 6, *а*) показали, что его структура неравномерная. После смещивания состава с SiO_2 и обработки в ультразвуковом поле наблюдается повышение равномерности распределения структурных элементов, увеличение их количества более чем на 50% (Рисунок 6, *б*), что подтверждает полученные результаты по адгезионной прочности, увеличившейся почти в два раза вследствие увеличения числа адгезионных связей. Аналогичные результаты были получены и для состава Loctite 496. Состав TK-200 имеет большее количество структурных элементов, чем Loctite 496.

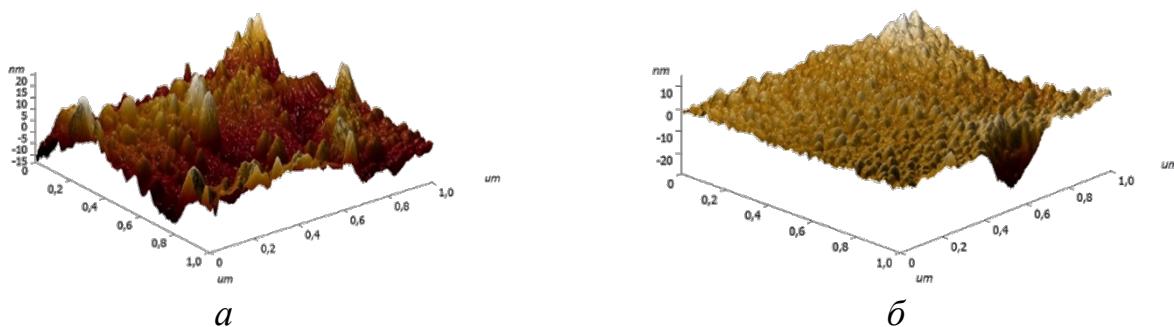


Рисунок 6.
Сканы поверхностей полимеров и нанонаполнителей:
а – TK-200; *б* – TK-200 и SiO_2

Таким образом, анализ структуры полимерных составов показал, что при смещивании их с наночастицами увеличивается количество структурных элементов и равномерность их распределения, что объясняет повышение адгезионной прочности нанокомпозиций.

В Главе 5 приведены разработанные рекомендации по выбору способа бездеформационного закрепления заготовок из немагнитных материалов на полимерную нанокомпозицию в условиях единичного производства (Рисунок 7).

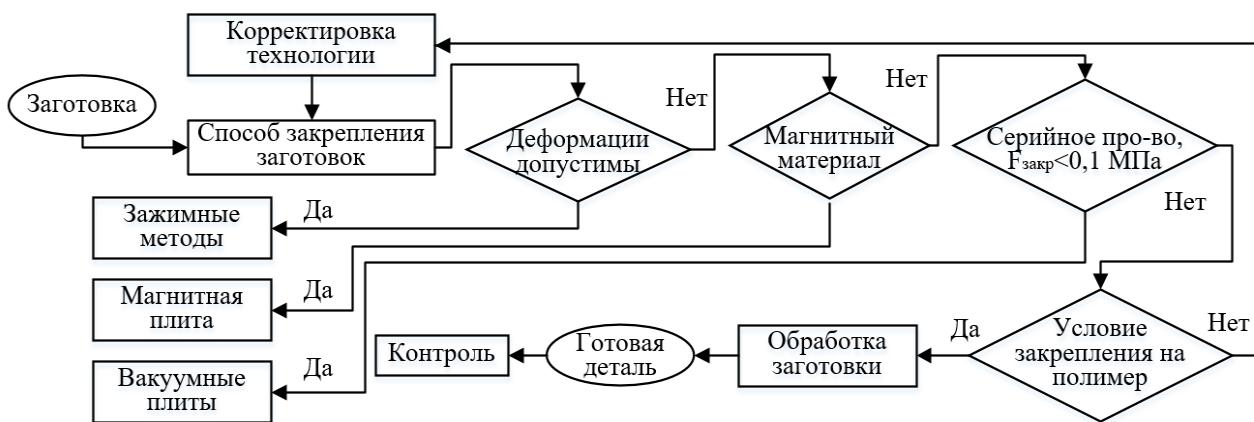


Рисунок 7.
Блок-схема выбора способа закрепления заготовок при фрезеровании

На основе результатов теоретических изысканий и экспериментальных исследований разработан способ бездеформационного закрепления заготовок с использованием нанонаполненных полимерных составов, который включает следующие операции: закрепление плиты на рабочем столе станка; очистку и обезжиривание поверхности плиты; нанесение клея; установку заготовки; механическую обработку; снятие (нагрев до 160 °C) и переустановку заготовки; окончательную обработку; снятие (нагрев до 160 °C) и очистку готовой детали.

С применением данного способа была изготовлена деталь «Корпус» (Рисунок 8). Согласно результатам измерений, на КИМ с ЧПУ CRYSTA-Apex S544 фирмы Mitutoyo получили полное соответствие готового изделия требованиям чертежа.

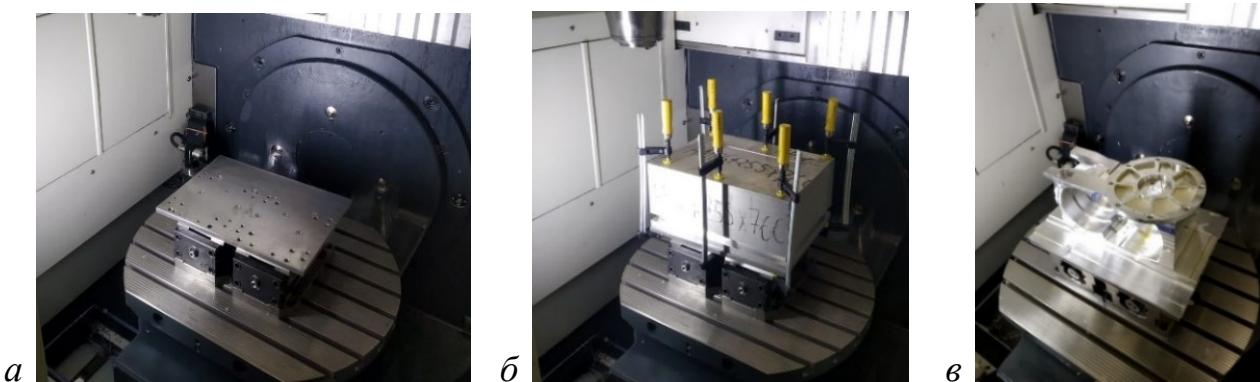


Рисунок 8.

Этапы технологического процесса изготовления детали:
а – закрепление жертвенной плиты в рабочей зоне станка; б – закрепление заготовки на полимерную нанокомпозицию; в – механическая обработка заготовки

Применение нового способа позволило сократить время фрезерования по сравнению со способом закрепления на вакуумной плите до трех раз и в зажимном приспособлении – до 1,2 раза путем увеличения подачи и глубины резания.

Предложенный способ обеспечивает существенное снижение погрешности установки заготовок, включающее уменьшение погрешностей базирования (при приклеивании заготовки по измерительной базе), закрепления (ввиду отсутствия силы закрепления) и приспособления (при использовании жесткой жертвенной плиты), по сравнению с использованием вакуумных и зажимных приспособлений.

Разработанный способ прошел производственные испытания и внедрен в АО «МПП имени В.В. Чернышева», АО «Российские космические системы» и АО «Протон-ПМ». Анализ показал, что при программе изготовления 120 деталей «Корпус» в год стоимость закрепления заготовок на клей меньше до 5 раз, а экономическая эффективность капитальных вложений больше до 18 раз, чем при закреплении на вакуумном и универсальном переналаживаемом приспособлениях, что свидетельствует об эффективности применения предложенной технологии.

ОБЩИЕ ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Установлено, что наиболее распространенные станочные приспособления для бездеформационного закрепления заготовок имеют ряд недостатков: магнитные плиты недопустимо использовать при работе с немагнитными материалами, а вакуумные столы сложны в эксплуатации в единичном и мелкосерийном производстве. Закрепление заготовок на полимерные клеи является потенциально востребованным способом. Добавление в клеи наноразмерных частиц способствует улучшению их механических и эксплуатационных свойств.

2. Разработана математическая модель, определяющая эквивалентные напряжения и деформацию в клеевом слое от сил резания и геометрических параметров заготовки, позволяющая оценить применимость технологии.

3. Разработаны новые нанокомпозиции на основе цианоакрилатных клеев, наномодифицированные диоксидом кремния с оптимальной массовой концентрацией 2% и удельной площадью поверхности частиц, равной $380 \text{ м}^2/\text{г}$, позволившие повысить прочность нанокомпозиций на основе отечественного состава ТК-200 с 25,1 до 46,3 МПа и зарубежного Loctite 496 – с 12,2 до 21,4 МПа.

4. Экспериментально подтверждено, что адгезионная прочность исследуемых нанокомпозиций зависит от материала субстрата. На образцах из латуни и алюминиевых сплавов получены сопоставимые значения прочности со стальными образцами, из бронзы – на 20% выше, а из фторопласта, полиацетали и полиамида – на 80–85% ниже, чем на стальных образцах.

5. Установлено, что при наномодифицировании составов на основе Loctite 496 и ТК-200 время набора их прочности сокращается в 2 раза, стойкость к вибрационным нагрузкам и смазочно-охлаждающим технологическим средам повышается соответственно до 37 и 63%, а теплостойкость – до 20%. Наилучшие показатели были получены для нанокомпозиции на основе отечественного состава.

6. Анализ структуры исследуемых материалов показал, что смешивание цианоакрилатного клея с наночастицами увеличивает количество структурных элементов более чем на 50% и равномерность их распределения по сравнению с ненаполненным составом. Это приводит к повышению количества адгезионных связей, что положительно сказывается на прочности полученных нанокомпозиций.

7. Разработанный способ бездеформационного закрепления с использованием нанонаполненных полимерных составов обеспечивает снижение погрешности при установке заготовок. Разработанные методика и расчетная программа позволяют принимать решение о применимости способа закрепления при конкретных геометрических параметрах заготовки и режимах фрезерования.

8. Разработанный способ защищен патентом РФ на изобретение, успешно прошел производственные испытания и внедрен в АО «МПП имени В.В. Чернышева», АО «Российские космические системы» и АО «Протон-ПМ». Его применение позволяет в условиях единичного производства повысить до 18 раз экономическую эффективность капитальных вложений, снизить до 5 раз стоимость операции закрепления заготовок и до 3 раз время их фрезерования по сравнению с использованием вакуумных и универсальных переналаживаемых зажимных приспособлений.

Список работ, опубликованных автором по теме диссертации

1. Хаббатуллин Р. Р., Кононенко А.С., Исследование стойкости цианоакрилатных kleев к воздействию вибраций и агрессивным средам при бездеформационной фиксации заготовок на металлорежущих станках // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2023. № 6 (362). С. 20-27. (0,5 п.л. / 1,0 п.л.).
2. Кононенко А. С., Хаббатуллин Р.Р. Исследование адгезии цианоакрилатных kleев к различным материалам при бездеформационной фиксации заготовок на металлорежущих станках // Фундаментальные и прикладные проблемы техники и технологии. 2023. № 3(359). С. 50-57. (0,56 п.л. / 1,12 п.л.).
3. Кононенко А. С., Хаббатуллин Р.Р. Теоретическое обоснование условия применимости способа бездеформационной фиксации заготовок с помощью полимерного kleя при механической обработке на фрезерных станках с ЧПУ // Клей. Герметики. Технологии. 2021. № 12. С. 20-26. (0,53 п.л. / 1,06 п.л.).
4. Kononenko A.S., Khabbatullin R.R., Ignatkin I.Y., Alipichev A.Y. Determining the Optimal Formulation of Cyanoacrylate Nanocomposition to Ensure Strain-Free Fixation of Workpieces on CNC Mills. In: Vasant P., et al. Intelligent Computing & Optimization. ICO 2023. Lecture Notes on Networks and Systems, vol 854. Springer, Cham. https://doi.org/10.1007/978-3-031-50151-7_40. (0,2 п.л. / 0,81 п.л.). (Scopus).
5. Патент № 2796031 С1 Российская Федерация, МПК B23Q 3/02. Способ бездеформационной фиксации заготовок для механической обработки : № 2021133489 : заявл. 18.11.2021 : опубл. 16.05.2023 / А. С. Кононенко, Р. Р. Хаббатуллин, Т. А. Кильдеев. – EDN ANUBOM.
6. Кононенко А. С., Хаббатуллин Р.Р. Использование полимерной цианоакрилатной нанокомпозиции для бездеформационной фиксации заготовок при фрезерной обработке // Сборник трудов IV международной научно-технической конференции «Современные достижения в области kleев и герметиков: материалы, сырье, технологии», Дзержинск, 26-28 сентября 2023 года. Н. Новгород, 2023. С. 269-273. (0,16 п.л. / 0,32 п.л.).
7. Хаббатуллин Р. Р., Кононенко А.С. Исследование влияния размера наночастиц на прочность полимерного состава // МашТех 2022. Инновационные технологии, оборудование и материалы заготовки в машиностроении : сборник трудов Международной научно-технической конференции, Москва, 24–26 мая 2022 года. Москва, 2022. С. 258-261. (0,16 п.л. / 0,32 п.л.).
8. Кононенко А. С., Хаббатуллин Р.Р. Анализ теорий адгезии для ремонтных полимерных составов в техническом сервисе транспортных средств // Инфокоммуникационные и интеллектуальные технологии на транспорте : сборник статей международной научно-практической конференции, Липецк, 20–21 апреля 2022 года / . Липецк, 2022. С. 279-282. (0,47 п.л. / 0,94 п.л.).
9. Кононенко А. С., Хаббатуллин Р.Р., Сережкин М.А. Определение оптимального состава цианоакрилатной нанокомпозиции для бездеформационной фиксации заготовок на фрезерных станках с ЧПУ // Ремонт. Восстановление. Модернизация. 2021. № 4. С. 34-39. (0,29 п.л. / 0,88 п.л.).

Подписано в печать _____. Формат 60×84/16.
Печать трафаретная. Усл.-печ. л. _____. Тираж ____ экз. Заказ № ____.
Отпечатано в издательском центре _____.
Адрес: _____.