

На правах рукописи



Шмидт Ирина Владимировна

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ
ТЕХНОЛОГИИ ОБРАБОТКИ ПРИ ВОССТАНОВЛЕНИИ
ПОВЕРХНОСТЕЙ ДЕТАЛЕЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ
ПОЛИМЕРНО-КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ**

Специальность 05.02.08 – «Технология машиностроения»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Челябинск – 2012

Работа выполнена в Федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего профессионального образования «Южно-Уральский государственный университет» (национальный исследовательский университет).

Научный руководитель – доктор технических наук, доцент
Кошин Анатолий Александрович.

Официальные оппоненты: **Кондаков Александр Иванович,**
доктор технических наук, профессор,
профессор кафедры
«Технология машиностроения»
ФГБОУ ВПО «Московский
государственный технический университет
имени Н.Э. Баумана»;

Орлов Александр Анатольевич,
кандидат технических наук,
доцент кафедры технологии
машиностроения Снежинского
физико-технического института филиала
ФГБОУ ВПО «Национальный
исследовательский ядерный университет
«Московский инженерно-физический
институт».

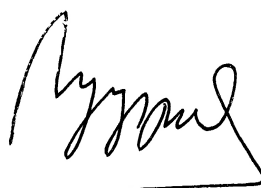
Ведущая организация – ФГБОУ ВПО «Алтайский государственный
технический университет им. И.И. Ползунова».

Защита диссертации состоится 24 мая 2012 г., в 15⁰⁰, на заседании диссертационного совета Д212.298.06 при Южно-Уральском государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск, пр. Ленина 76, ауд. 201а главного корпуса.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Южно-Уральского государственного университета.

Автореферат разослан 23 апреля 2012 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета



И.А. Щуров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. В различных отраслях промышленности (металлургия, энергетическое и тяжелое машиностроение и др.) для продления срока службы узла традиционно производится замена изношенной детали или ее восстановление. Традиционные методы продления срока службы деталей и восстановления изношенных (напыление, наплавка, металлизация и др.) требуют наличия сложного технологического оборудования и квалифицированного персонала, кроме этого сопряжено с длительной остановкой оборудования.

Успехи современного материаловедения привели к созданию эффективных технологий восстановления поверхностей деталей с применением полимерно-композиционных материалов с дисперсными наполнителями из металлов и их карбидов (ПКМ).

Полимерно-композиционные материалы наносятся в пастообразном состоянии на поверхность, тем самым **формируя конструкцию в виде слоистой системы**. После полимеризации ПКМ восстановленные поверхности деталей приобретают заданные эксплуатационные свойства.

На сегодняшний день мировая промышленность выпускает более 500 марок ПКМ, имеющих различные свойства и предназначенных как для технологий восстановления поверхностей, так и для новых изделий. Однако рекомендации по работе с этими материалами ограничиваются лишь указаниями по нанесению их и сушке. Рекомендации по обработке материалов после полимеризации практически отсутствуют.

Слоистая система образует рабочую поверхность изделия. Для достижения точности и качества поверхностей слоистые системы подвергаются финишной механической обработке. Наиболее применяемыми методами окончательной обработки являются точение и шлифование. Процесс обработки этими методами сопряжен с силовым и тепловым воздействием на обрабатываемую заготовку. Практика показывает, что при обработке слоистых систем кроме традиционного дефекта – прижога шлифуемой поверхности, наблюдается целый ряд дополнительных, специфических дефектов: деструкция внутренних слоев, разрушение целостности слоистой системы.

Имеющиеся исследования по обработке полимерно-композиционных материалов В.И. Дрожжина, А.А. Степанова, В.М. Петрова, А. Koplev, X.M. Wang, N. Bhatnagar, N.S. Hu, R. Komanduri и др. исследователей показывают, что обработка волокнистых ПКМ сопряжена с образованием специфических для них дефектов.

В настоящее время исследований по технологии обработки слоистых систем практически нет. Можно выделить лишь несколько работ, посвященных шлифованию слоистых систем, как частных конструктивных случаев.

Таким образом, появление прогрессивных технологий восстановления поверхностей деталей требует соответствующих методов их проектирования, разработки рекомендаций по назначению режимов обработки этих поверхностей.

Цель. Повышение эффективности обработки слоистых полимерно-композиционных систем путем назначения предельных бездефектных режимов резания.

Для достижения поставленной цели необходимо решить следующие *задачи*.

1. Исследование напряженного состояния слоистой системы при механической обработке.
2. Разработка модели температурного поля слоистой системы при шлифовании.
3. Разработка методики назначения эффективных режимов бездефектной обработки для операций точения и шлифования.

Научная новизна

1. Выявлены закономерности влияния конструктивных параметров слоистой системы (толщины слоев, марки ПКМ) и технологических условий ее обработки (режимы резания, смазочно-охлаждающие технологические средства) на дефектообразующие показатели.

2. Разработана *модель температурного поля* в слоистой системе при шлифовании, в которой наряду с теплоотдачей в технологическую жидкость и распределением температур по слоям системы впервые учтена возможная пористость внешнего слоя системы.

3. Создана *методика исследования напряженного состояния* слоистой системы при ее механической обработке, которая отражает напряженное состояние слоев в опасных зонах (зона резания, стыки слоев, зона закрепления); схему нагружения в виде распределенного вектора, произвольно заданного в пространстве с возможностью его перемещения вдоль заготовки; схему закрепления в зависимости от способа установки заготовки на станке, особенности деформирования материалов слоев.

4. Разработана *методика назначения эффективных режимов бездефектной обработки для операций точения и шлифования*, учитывающая пять показателей дефектообразования во всех слоях системы.

Практическая ценность

1. Разработан комплекс расчетных модулей (*PNSS и TEMSIS*), позволяющих моделировать группы ограничений по несущей способности слоистой системы и теплостойкости ее слоев, являющимися показателями дефектообразования, в зависимости от конструкции слоистой системы и технологических условий ее обработки.

2. Для типовых конструкций и технологий создан *альбом полей напряжений и температур* в характерных точках, составляющий базу *инженерной методики* проектирования технологии *бездефектной* финишной обработки слоистых систем.

3. Проведена *двухуровневая систематика* промышленных полимерно-композиционных материалов по 12 критериям, позволяющая разрабатывать рекомендации по технологии обработки слоистых систем для групп свойств ПКМ.

4. Разработана *инженерная методика* назначения режимов резания при обработке слоистых систем, гарантирующая ее бездефектность и обеспечивающая все технологические требования. Эта методика оформлена в виде РТМ для предприятий.

Внедрение результатов работы

Результаты работы внедрены на двух специализированных ремонтных предприятиях Уральского региона.

Карты режимов резания для точения и шлифования слоистых систем включены в справочник «Межотраслевые укрупненные нормативы времени на ремонт и восстановление деталей с использованием полимерно-композитных материалов» (переиздание 2011 г.).

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на научно-технических конференциях в ЮУрГУ (2009, 2010, 2011 гг.), всероссийских научно-технических конференциях (МГТУ им. Н.Э. Баумана, г. Москва – 2009, 2010, 2011 гг., ТГУ, г. Тольятти – 2009 г., НГТУ, г. Новосибирск – 2009 г.), международных конференциях (г. Санкт-Петербург – 2010 г., г. Курск – 2011 г., г. Тольятти – 2011 г.). Результаты работы прошли промышленную апробацию.

Публикации по теме. По теме работы опубликовано 15 печатных работ в виде научных статей (в том числе из них 3 по списку ВАК), справочных материалов, докладов на всероссийских и международных конференциях.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, основных выводов, списка литературы (144 наименования) и четырех приложений. Работа изложена на 296 страницах машинописного текста, включает 71 рисунок и 56 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Теоретические предпосылки работы

Полимерно-композиционные материалы в силу их высокой технологичности дают принципиально новые и более широкие возможности для восстановления изношенных поверхностей деталей уникального оборудования тяжелого машиностроения, энергетики, металлургии и др. областей промышленности.

Полимерно-композиционные материалы (ПКМ) относятся к классу дисперсных материалов и представляют собой систему из полимерного связующего и частиц наполнителя из металлов или их карбидов.

В настоящее время в Челябинской области существует ряд предприятий, специализирующихся на восстановлении поверхностей деталей промышленного оборудования с использованием ПКМ: ЗАО «ПТК Парма Сервис» (г. Магнитогорск), ООО «Обион» (г. Златоуст), ООО «Техмехэнергосервис» (г. Челябинск) и др. В работе приведены примеры ремонтов, позволяющих не только сократить время простоя оборудования (по сравнению с традиционными технологиями), но и выполнить его без демонтажа восстанавливаемого узла.

Полимерно-композиционный материал наносится на восстанавливаемую поверхность в виде покрытия, образуя при этом **слоистую систему из разнородных материалов**, имеющих различные механические и теплофизические свойства.

Слоистые системы применяются и *в новых конструкциях* – это направляющие металлорежущих станков, малогабаритные подшипники скольжения с антифрикционными покрытиями, биметаллические детали, слоистые системы, образованные путем склеивания деталей и др. Имеются и уникальные слоистые системы, например, двухслойная система с рабочим слоем из пористых металлов (Department of Engineering, University of Liverpool, Liverpool, UK). Приведенные примеры показывают широкие перспективы применения слоистых сис-

тем. Для еще большего распространения этих систем нужны технологические рекомендации по их созданию и обработке.

Технологические проблемы. Характер дефектов в слоистой системе более сложен – дефектным может оказаться любой из слоев системы. Появились новые виды дефектов: отслоения, деструкция композита и т. д.

Анализ производственного опыта позволил выделить два типа дефектов: дефекты силовой природы (отслоения, разрушение материала слоя) и тепловой природы (термическая деструкция, прижоги).

Для создания бездефектной технологии необходимы модели, связывающие факторы управления с дефектообразующими показателями. К настоящему времени накоплен большой багаж моделей, как силовых, так и теплофизических, для монодеталей. Эти модели могут служить базой для их развития на случай слоистой системы.

Поэтому для разработки технологии бездефектной обработки необходимо исследовать вопросы напряженного состояния слоистой системы при механической обработке и теплофизику процесса шлифования слоистой системы.

В настоящее время на производстве распространение получили два класса слоистых систем с ПКМ: двухслойные типа «ПКМ – металл» (рис. 1а) и трехслойные типа «металл – ПКМ – металл» (рис. 1б), такие конструкции систем являются типовыми. Поэтому моделирование произведено для общего случая n -слойных систем, а практические рекомендации разработаны для этих двух типов систем.

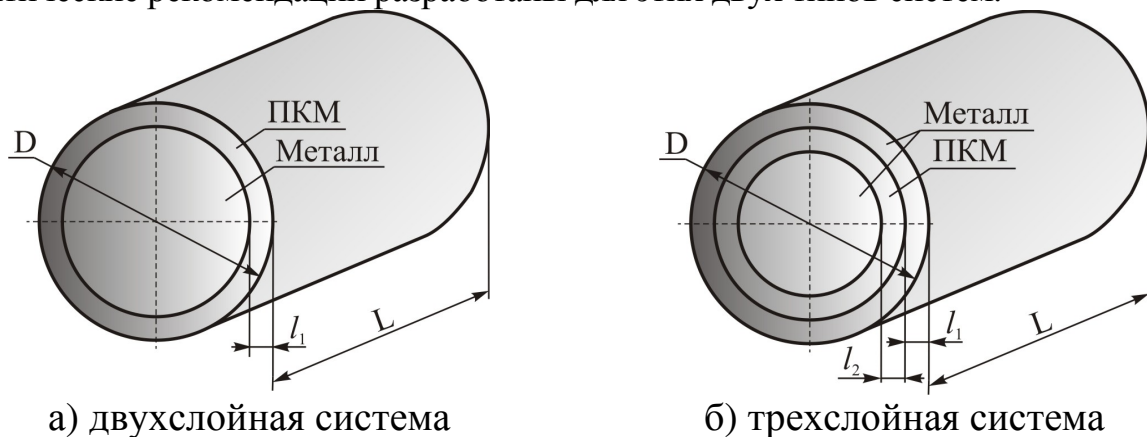


Рис. 1. Типовые конструкции слоистых систем

(D – диаметр слоистой системы, мм; l_1 – толщина рабочего слоя, мм; l_2 – толщина внутреннего слоя из ПКМ, мм; L – длина слоистой системы, мм)

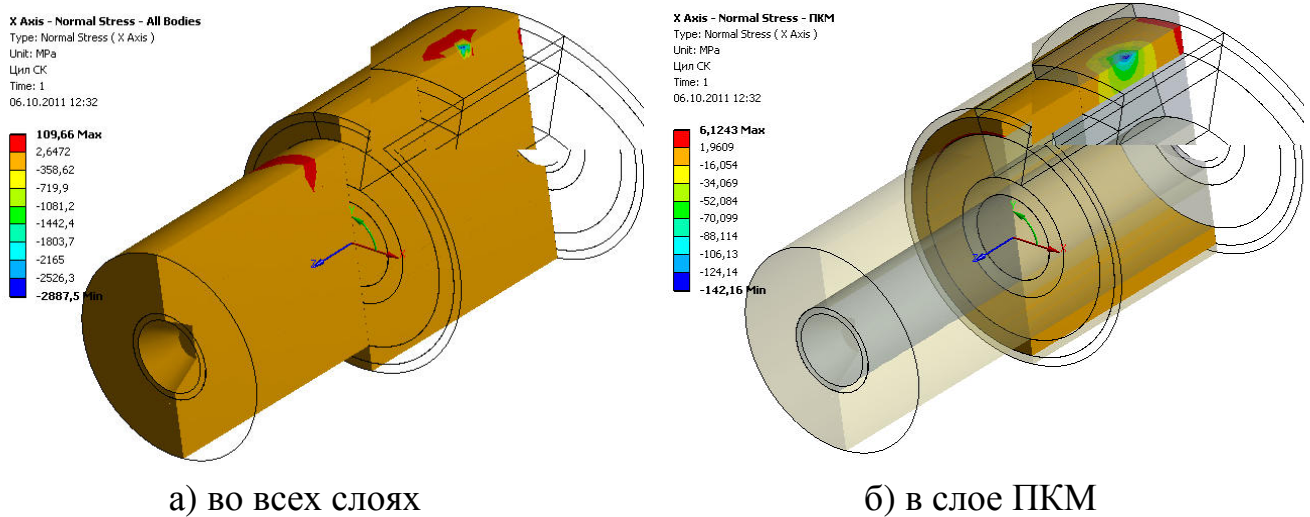
Исследование напряженного состояния слоистой системы при механической обработке

Поскольку тяжело нагруженные системы, как правило, являются телами вращения, то и задача расчета напряженного состояния слоистой системы из n слоев ставилась для тел вращения.

С использованием методов теории упругости поставлена задача описания напряженного состояния, включающая уравнения напряжений в слоистой системе, описание прикладываемой нагрузки и способов закрепления, а также модель среды. Средствами Workbench ANSYS сформирована конечно-элементная модель с неравномерной сеткой конечных элементов. Нагрузка задается рас-

пределенной по пятну контакта инструмента с заготовкой. Условия равновесия описываются в виде фиксации в пространстве построенных поверхностей. Деформационная модель среды представлена в виде линейной модели упругого деформирования для каждого слоя, где деформационные характеристики для металлов приняты из справочников, для ряда ПКМ определены экспериментально в центре «Нанотехнологии» ЮУрГУ.

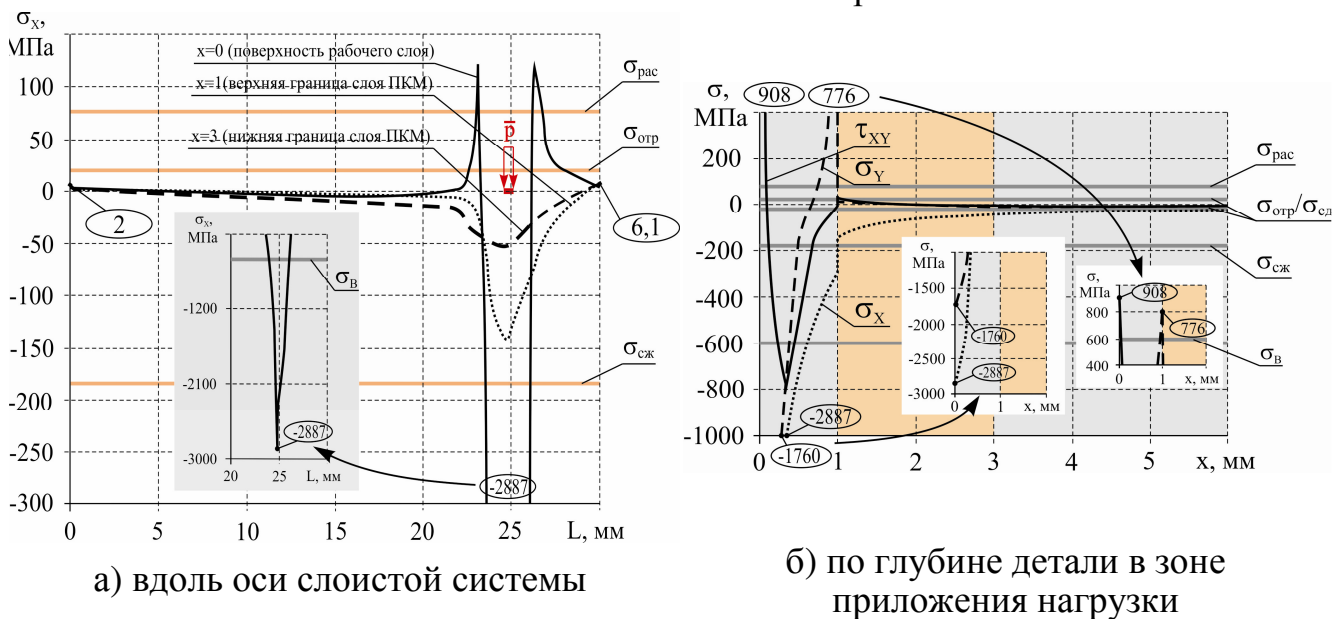
Результатом расчета являются поля напряжений (рис. 2).



а) во всех слоях

б) в слое ПКМ

Рис. 2. Поля нормальных напряжений σ_x в слоистой системе типа «металл – ПКМ – металл» при точении



а) вдоль оси слоистой системы

б) по глубине детали в зоне приложения нагрузки

Рис. 3. Эпюры напряжений в слоистой системе типа «металл – ПКМ – металл» при точении

($\sigma_{рас}$, $\sigma_{сж}$, $\sigma_{сд}$, $\sigma_{отр}$ – напряжения растяжения, сжатия, сдвига, отрыва; x – координата по глубине заготовки; σ_x , σ_y – нормальные напряжения по осям X и Y ; τ – касательные напряжения)

Анализ полей напряжений (рис. 2) и построенных по ним эпюр (рис. 3) напряжений показал наличие *характерных* точек – точек, где напряжения достигают своего экстремума. У каждого из слоев системы таких точек может быть несколько.

Оценку влияния конструкции слоистой системы и технологических условий на ее напряженное состояние имеет смысл проводить в *характерных* точках, т. е. точках экстремумов. Влияние всех параметров рассматривалось именно в этих точках. На рис. 4 показано влияние конструктивных и технологических параметров в *характерной* точке для системы типа «металл – ПКМ – металл».

В *характерных* точках при повышении нагрузки напряжения могут возрастать и достигать предела прочности материала слоя (рис. 2–3). Тогда эти точки переходят в разряд *критических*, т.е. они становятся дефектообразующими.

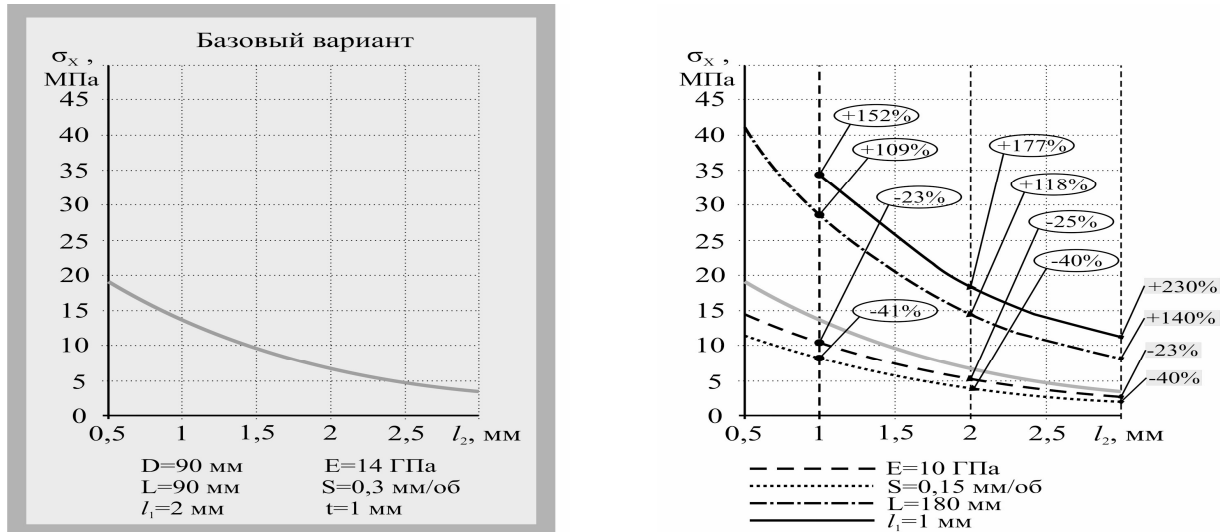


Рис. 4. Влияние конструкции слоистой системы типа «металл – ПКМ – металл» D90 мм и технологических факторов на максимальные нормальные растягивающие напряжения σ_x при точении.

Базовый вариант: металл – сталь 45, ПКМ – Diamant MM Stahl 1361.

Для остальных вариантов указаны изменения, $E=10$ ГПа – Belzona 1111.

На основе рассчитанных 3000 полей напряжений для типовых конструкций слоистых систем, способов закрепления и нагрузок сформирован альбом типовых решений, который является основой для разработки инженерной методики назначения бездефектных режимов резания.

В результате анализа полей напряжений типовых конструкций слоистых систем установлены основные закономерности влияния конструкции слоистой системы и технологии ее обработки на дефектообразующие показатели (см. рис. 4а, б).

В зависимости от марки ПКМ при равных условиях значения дефектообразующих показателей изменяются до 35-50%. При одинаковой нагрузке в зависимости от толщины слоев эти же показатели изменяются до 5-8 раз. Это влияние необходимо знать и учитывать его при проектировании технологии.

Также существенное влияние на дефектообразующие показатели оказывают и режимы резания, так варьирование подачей позволяет изменять максимальные напряжения до 35-50% в зависимости от метода обработки слоистой системы. Эти параметры могут быть приняты в качестве управляющих при организации технологии обработки слоистых систем.

На основе результатов анализа напряженного состояния типовых конструкций слоистых систем разработаны рекомендации минимальным толщинам слоев материалов (табл. 1).

Минимальные толщины слоев

№ п/п	Диаметр слоистой системы, мм	Степень нагруженности восстанавливаемой поверхности		
		высокая		низкая
		Тип слоистой системы		
		«металл – ПКМ – металл»		«ПКМ – металл»
		Толщина слоя, мм		
		рабочий слой	слой ПКМ	слой ПКМ
1	до 30	>1	2-3	>2
2		>2	0,5-1	
3	до 90	>1	2-3	
4		>2	0,5-2	
5	до 150	>1	2-4	
6		>2	0,5-3	
7	св. 150	>2	>2	>4

Для расчета напряженного состояния слоистой системы разработана программа PNSS, которая может служить расчетным модулем для создания виртуального стенда отладки конструкции системы и технологических условий ее обработки.

Теплофизическая модель слоистой системы при шлифовании

Поскольку для систем типа «ПКМ – металл» возможна ситуация, когда ПКМ является пористым материалом, появляется дополнительное поглощение тепла. Тогда картина теплопередачи резко меняется. Чтобы это учесть, впервые вводится внутренняя распределенная теплоотдача в обрабатываемом слое, пропорциональная температуре – νU . С учетом этого уравнение теплопроводности принимает вид:

$$\text{в первом слое } c_1 \rho_1 \frac{\partial U_1}{\partial t} = \lambda_1 \frac{\partial^2 U_1}{\partial x^2} - \nu U_1; \quad x \in [l_0; l_1]; \quad l_0 = 0; \quad (1)$$

$$\text{во внутренних слоях } c_i \rho_i \frac{\partial U_i}{\partial t} = \lambda_i \frac{\partial^2 U_i}{\partial x^2}; \quad x \in \left[\sum_{j=0}^{i-1} l_j; \sum_{j=0}^i l_j \right]; \quad i = 2, 3, \dots, n,$$

где c_1 – теплоемкость обрабатываемого слоя системы; ρ_1 – плотность обрабатываемого слоя системы; U_1 – температура в обрабатываемом слое системы; t – время; λ_1 – теплопроводность обрабатываемого слоя; x – координата по глубине заготовки; ν – коэффициент внутренней теплоотдачи; l_0 – обрабатываемая поверхность; l_1 – толщина обрабатываемого слоя системы; c_i – теплоемкость i -го слоя системы; ρ_i – плотность i -го слоя системы; U_i – температура в i -ом слое системы; l_i – толщина i -го слоя системы; n – количество слоев системы.

Ставится смешанная краевая задача. На левом конце первого слоя (обрабатываемая поверхность) – условие второго рода при действии теплового источника и третьего – при его отключении. На стыках внутренних слоев задается краевое условие четвертого рода – равенство температур и тепловых потоков.

Построено кусочно-аналитическое решение этой задачи с использованием квадратичной интерполяции, которое реализовано в виде программного модуля TEMSIS. Результатом расчетов является массив температур и эпюры температур по глубине детали в каждый момент времени (рис. 5).

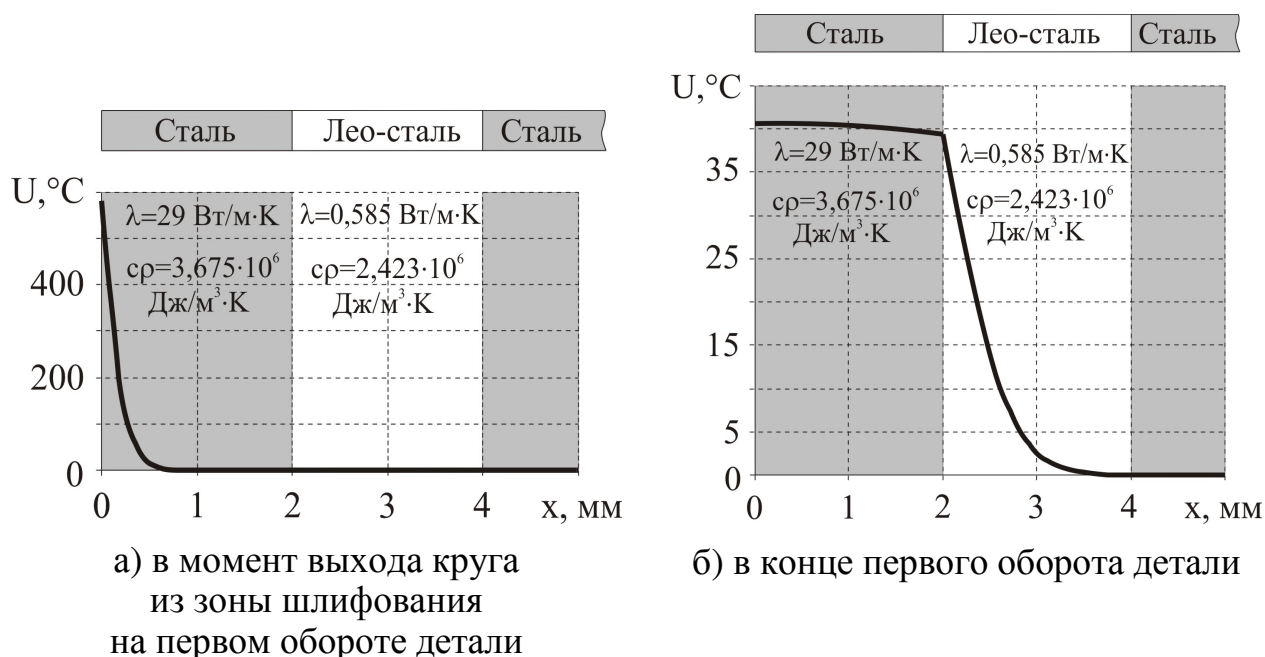


Рис. 5. Эпюры температур по глубине детали (слоистая система «металл – ПКМ – металл» $D=100$ мм; $l_1=2$ мм, $l_2=2$ мм)

Из температурных эпюр по глубине заготовки (см. рис. 5) виден их монотонно убывающий характер. Максимальные температуры наблюдаются на верхних границах слоев – это и есть *характерные* точки, определяющие теплоустойчивость слоев системы.

Круглое врезное шлифование, как правило, процесс цикловый, поэтому необходимо рассматривать изменение температур в *характерных* точках в течение цикла (рис. 6). Здесь видно, что при достижении в *характерной* точке температуры, предельной для материала слоя, эта точка переходит в разряд *критической*, т.е. может стать причиной дефектообразования.

В результате анализа максимальных температур в типовых конструкциях слоистых систем установлены закономерности влияния конструкции системы и технологии ее обработки на дефектообразующие показатели.

В зависимости от марки ПКМ при равных условиях значения дефектообразующих показателей изменяются до 15-20%, а в зависимости от толщины слоев эти же показатели изменяются до 30%. Это влияние необходимо знать и учитывать его при проектировании технологии обработки слоистых систем.

Существенное влияние оказывают и технологические параметры, так изменение подачи приводит к почти пропорциональному изменению максимальных температур. Как и в предыдущей задаче, режимы резания могут быть приняты в качестве параметров управления при проектировании технологии обработки.

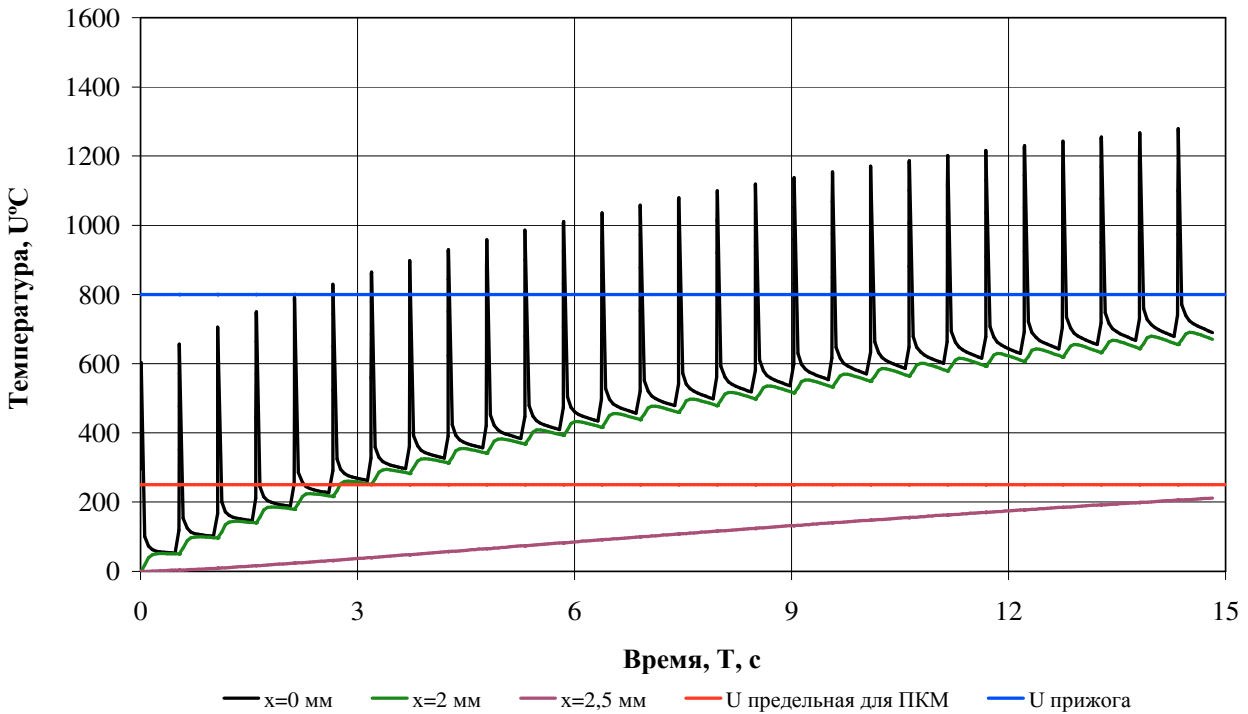


Рис. 6. Температуры в характерных точках слоистой системы типа «металл – ПКМ – металл» в цикле шлифования (конструкция: металл – сталь 45, ПКМ – Thortex Metal Tech EG D=60 мм, L=60 мм, $l_1=2$ мм, $l_2=0,5$ мм; технология: $2\Pi=1$ мм, $n_3=113$ об/мин, $V_{\text{спрад}}=1,62$ мм/мин, $t=0,0143$ мм/об, $L_k=1,769$ мм, $q=0,8534 \cdot 10^9$ Вт/м², $\lambda=0,6$ Вт/ м·К, $c_p=2,43 \cdot 10^6$ Дж/м³·К).

Оценка влияния конструкции слоистой системы и технологических условий ее обработки на максимальные температуры проведена в *характерных* точках (рис. 7).

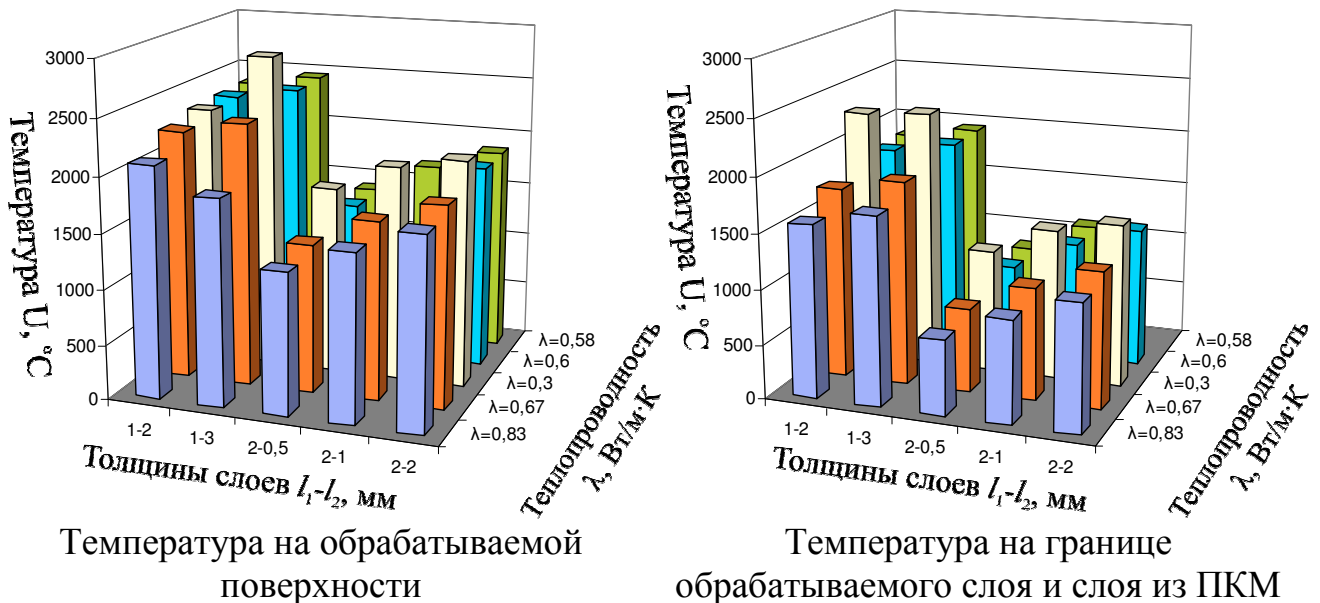


Рис. 7. Влияние конструкции слоистой системы типа «металл – ПКМ – металл» на максимумы температур в характерных точках

С помощью модуля TEMSIS проведен анализ 600 температурных полей для типовых конструкций слоистых систем, оформленных в виде альбома типовых решений.

Проектирование бездефектной обработки слоистых систем

Разработанные методика и модель составляют базу для разработки методики расчетного проектирования бездефектной технологии обработки слоистых систем.

Несущая способность системы обуславливается такими дефектообразующими показателями, как напряжения – растяжения, сжатия, отрыва, сдвига, которые образуют первые четыре неравенства в системе (2). Ограничение по теплостойкости материалов слоев дает еще одно неравенство. Поскольку необходимо выполнение каждого из этих требований одновременно, имеем систему неравенств относительно параметров управления:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_{\text{рас}} = f_r(S, V, t, \nu_{1,2,\dots,n}, E_{1,2,\dots,n}, l_{1,2,\dots,n}, L, D) \leq \sigma_{\text{рас пред}} ; \\ \sigma_{\text{сж}} = f_c(S, V, t, \nu_{1,2,\dots,n}, E_{1,2,\dots,n}, l_{1,2,\dots,n}, L, D) \leq \sigma_{\text{сж пред}} ; \\ \tau = f_s(S, V, t, \nu_{1,2,\dots,n}, E_{1,2,\dots,n}, l_{1,2,\dots,n}, L, D) \leq \sigma_{\text{сд пред}} ; \\ \sigma_{\text{отр}} = f_o(S, V, t, \nu_{1,2,\dots,n}, E_{1,2,\dots,n}, l_{1,2,\dots,n}, L, D) \leq \sigma_{\text{отр пред}} ; \\ U_{\text{сл.}i} = f_{vc}(V_{S_{\text{рад}}}, V_d, 2\Pi, l_{1,2,\dots,n}, c_{1,2,\dots,n}, \rho_{1,2,\dots,n}, \lambda_{1,2,\dots,n}, D, L) \leq U_{\text{сл.}i \text{ пред}} , \end{array} \right. \quad (2)$$

где $\sigma_{\text{рас}}$, $\sigma_{\text{сж}}$, $\sigma_{\text{отр}}$ – напряжения растяжения, сжатия, отрыва; S – подача; V – скорость резания; t – глубина резания; ν – коэффициент Пуассона; E – модуль упругости; D – диаметр слоистой системы; $\sigma_{\text{рас пред}}$, $\sigma_{\text{сж пред}}$, $\sigma_{\text{сд пред}}$, $\sigma_{\text{отр пред}}$ – предельные напряжения растяжения, сжатия, сдвига, отрыва τ – касательные напряжения; $U_{\text{сл}}$ – температура в слое; $V_{S_{\text{рад}}}$ – скорость радиальной подачи; V_d – скорость детали; 2Π – припуск на обработку на диаметр; L_k – длина дуги контакта.

Система неравенств (2) должна быть выполнена в каждой *характерной* точке слоистой системы.

Полученная система есть математическая формулировка задачи определения бездефектных режимов резания.

Эта задача относится к задачам математического программирования. В соответствии с методами математического программирования строится область допустимых параметров управления, в нашем случае скорость V и подача S , по каждому из дефектообразующих показателей. Их пересечение дает общую область бездефектных режимов, которые гарантируют выполнение всех требований одновременно (рис. 8). Эта область не вырождается в точку, т. е. существует некоторая область допустимых режимов. Поэтому вводится критерий оптимальности. В работе условие оптимальности – это минимум основного времени t_0 . На рис. 8 показано, область допустимых режимов резания для точения слоистой системы типа «металл – ПКМ – металл». В данном случае область допустимых режимов формируется следующими активными ограничениями: нор-

мальными σ_x и касательными τ_{xy} напряжениями. Для этого случая получили оптимальный режим $V_{opt}=330$ м/мин; $S_{opt}=0,258$ мм/об.

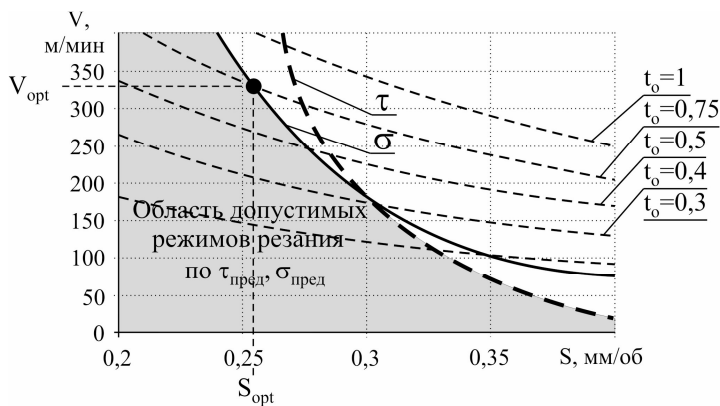


Рис. 8. Пример построения допустимой области и поиска оптимальных режимов для точения слоистой системы

для точения слоистой системы

типа «металл – ПКМ – металл»:

ПКМ – Diamant MM Stahl 1361,

металл – сталь 45, $D=90$ мм, $l_1=2$ мм,

$l_2=1$ мм, $t=0,5$ мм, $S=0,3$ мм/об, $V=185$ м/мин

Для реализации общей схемы поиска бездефектных режимов предлагается два варианта методик.

Первый вариант – **интерактивный алгоритм**, основанный на альбоме типовых решений. Согласно предложенному алгоритму по критической точке (из альбома типовых решений) достраиваются границы области допустимых режимов и определяется оптимальный режим. Этот алгоритм предназначен для интерактивного использования технологиями при проектировании бездефектных технологий.

Поскольку этот алгоритм справедлив лишь для просчитанных типовых наладок, то для оригинальных наладок или других технологических условий предлагается **расчетный алгоритм**.

В этом алгоритме просчитываются все *характерные* точки во всех слоях системы, складываются все области допустимых режимов. В результате получается одна общая область допустимых режимов, в которой находится оптимальный режим, гарантирующий бездефектность.

Такой алгоритм сопряжен с некоторыми вычислительными трудностями, поэтому предполагается его использование в виде расчетного модуля в САЕ-системах технологического назначения.

Принятый подход по назначению бездефектных режимов доведен до уровня традиционной нормативной методики – **инженерной методики** на базе рассчитанных типовых конструкций слоистых систем.

Практическая реализация результатов работы

В инженерной методике рекомендации по бездефектным режимам оформлены в виде традиционных для технологических справочников таблиц решений (табл. 2). Предельная бездефектная подача сопоставляется с рекомендуемой по шероховатости, меньшая из них принимается. Далее определяется скорость резания и т.д.

В рамках разработки методики проектирования технологии финишной обработки слоистых систем, разработаны рекомендации по выбору метода обработки, оформленные в виде таблицы соответствий (табл. 3).

Для более полного охвата номенклатуры промышленных полимерно-композитных материалов проведена их *двухуровневая систематика*, позво-

ляющая при разработке технологий создания слоистых систем использовать ПКМ по группам их свойств.

Таблица 2

Предельные бездефектные режимы шлифования
слоистых систем типа «ПКМ – металл»

Ширина обработки, В, мм, до	Диаметр детали, D, мм, до	Частота вращения заготовки, n, об/мин	Твердость ПКМ, НВ, МПа, до		
			60	75	105
			Скорость радиальной подачи, V _{спр} , мм/мин		
...
45	30	167	0,39	0,29	0,20
	60	113	0,24	0,18	0,12
	90	88	0,18	0,13	0,08
	120	77	0,14	0,10	0,07
	150	67	0,11	0,08	0,05
...

Таблица 3

Выбор метода обработки

Вид обработки	Тип слоистой системы	Диаметр слоистой системы, D, мм	Толщина рабочего слоя, l ₁ , мм							
			<5				>5			
			Точность обработки, IT, квалитет							
			точнее 8		грубее 8		точнее 8		грубее 8	
			Шероховатость поверхности, Ra, мкм							
			1,25	2,5	1,25	2,5	1,25	2,5	1,25	2,5
			Метод обработки							
Точение	«металл – ПКМ – металл»	<150								
		>150								
	«ПКМ – металл»	<150								
		>150								
Шлифование	«металл – ПКМ – металл»	<150								
		>150								
	«ПКМ – металл»	<150								
		>150								

Разработанные рекомендации по бездефектным режимам обработки слоистых систем оформлены в виде *руководящих технических материалов*, которые внедрены на ряде предприятий Уральского региона.

Кроме того, разработаны карты режимов резания для точения и шлифования слоистых систем, которые вошли в справочник «Межотраслевые укрупненные нормативы времени на ремонт и восстановление деталей с использованием полимерно-композитных материалов» (переиздание 2011 г.).

Сопоставление технологий финишной обработки слоистых систем: спроектированной интуитивно на специализированных ремонтных предприятиях и на основе рассчитанных по разработанной методике режимов обработки показало, что

работа на предельных научно обоснованных режимах резания повышает производительность до 20–47 %, в зависимости от метода обработки.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ОБЩИЕ ВЫВОДЫ

Результаты:

1. Создана *методика исследования напряженного состояния* слоистой системы при ее механической обработке, которая отражает:
 - напряженное состояние слоев в опасных зонах (зона резания, стыки слоев, зона закрепления);
 - схему нагружения в виде распределенного вектора, произвольно заданного в пространстве с возможностью его перемещения вдоль заготовки;
 - схему закрепления в зависимости от способа установки детали на станке;
 - особенности деформирования материалов слоев.
2. Разработана *модель температурного поля* в слоистой системе при шлифовании, в которой наряду с теплоотдачей в технологическую жидкость и распределением температур по слоям системы впервые учтена возможная пористость внешнего слоя системы.
3. Выделены *характерные* точки на рассчитанных полях (напряжений, температур), в которых возможно образование дефектов. При достижении предельных значений (температур, напряжений) для материала любого из слоев системы *характерные* точки становятся *критическими*. Наличие *характерных* и *критических* точек является основой для определения **бездефектных** технологических условий.
4. Разработан комплекс расчетных модулей (*PNSS* и *TEMSIS*), позволяющих моделировать группы ограничений по несущей способности слоистой системы и теплостойкости ее слоев, являющимися показателями дефектообразования, в зависимости от конструкции слоистой системы и технологических условий ее обработки.
5. Произведен расчет температурных полей и полей напряжений в характерных точках для типовых конструкций слоистых полимерно-композиционных систем (двухслойных, трехслойных), применяемых при ремонте тяжело нагруженного оборудования предприятий тяжелого машиностроения, металлургии, энергетики. Полученные поля напряжений и температур оформлены в виде альбома типовых решений, составляющий базу *инженерной методики* проектирования технологии **бездефектной** обработки слоистых систем.
6. Разработана *схема* определения режимов бездефектной обработки слоистых систем, учитывающая по пять параметров дефектообразования в каждом слое системы.
7. На основе схемы расчета режимов резания разработана методика проектирования эффективной обработки слоистых систем, гарантирующей отсутствие дефектов, которая включает:
 - *интерактивный алгоритм* для определения технологических условий бездефектной обработки слоистых систем типовых конструкций, использующий базу типовых решений (альбом типовых решений);

- *расчетный алгоритм* для расчета в автоматическом цикле технологических условий бездефектной обработки оригинальных слоистых систем;
- *инженерную методику* назначения режимов резания при обработке слоистых систем, оформленной в виде РТМ для предприятий.

8. Проведена *двухуровневая систематика* промышленных полимерно-композиционных материалов по 12 критериям, позволяющая разрабатывать рекомендации по технологии обработки слоистых систем для групп свойств ПКМ.

Выводы:

1. Установлено, что при обработке слоистых систем точением и шлифованием в каждом слое системы образуются 2 типа дефектов, обусловленные:

- превышением предельных напряжений материалов слоев, которые являются 4 показателями дефектообразования – напряжения растяжения, сжатия, сдвига, отрыва;

- превышением предельной теплостойкости материалов слоев, которая является дефектообразующим показателем – предельной температурой материалов слоев.

Если дефект образуется во внутреннем слое, то он носит скрытый характер, который проявится только при эксплуатации готовой детали.

2. Установлено наличие в каждом слое системы *характерных* точек, где значения дефектообразующих показателей (напряжения, температуры) достигают максимума. Для проектирования **бездефектной** обработки достаточно рассматривать влияние условий обработки на значения дефектообразующих показателей в *характерных* точках.

3. Установлено влияние конструктивных параметров на дефектообразующие показатели для типовых конструкций слоистых систем:

- при токарной обработке систем типа «металл – ПКМ – металл» **подбор марки ПКМ** позволяет снизить напряжения в *характерных* точках до 35 %, для систем типа «ПКМ – металл» – до 50 %;

- при токарной обработке систем типа «металл – ПКМ – металл» уменьшение **толщины** внешнего **слоя** приводит к увеличению напряжений в *характерных* точках до 200 %, а уменьшение толщины слоя ПКМ – к увеличению до 5 раз; при точении систем типа «ПКМ – металл» уменьшение толщины внешнего слоя ПКМ приводит к увеличению напряжений в *характерных* точках до 130 %;

- при **шлифовании подбором марки ПКМ** достигается снижение напряжений в *характерных* точках систем типа «металл – ПКМ – металл» до 20 %; систем типа «ПКМ – металл» – до 55 %;

- при **шлифовании** систем типа «металл – ПКМ – металл» уменьшение **толщины** внешнего **слоя** приводит к увеличению напряжений в *характерных* точках до 80 %, а уменьшение толщины слоя ПКМ приводит к увеличению напряжений до 8 раз; для систем типа «ПКМ – металл» уменьшение толщины внешнего слоя из ПКМ приводит к увеличению напряжений в *характерных* точках до 60 %;

- при шлифовании систем типа «металл – ПКМ – металл» **подбор марки ПКМ** позволяет снизить температуры в *характерных* точках не более чем на 20 %, для систем типа «ПКМ – металл» – не более 15 %;

– при шлифовании систем типа «металл – ПКМ – металл» увеличение **толщины внешнего слоя** или уменьшение толщины слоя ПКМ приводит к снижению температур на 30 %.

4. Установлено влияние технологических параметров на дефектообразующие показатели для типовых конструкций слоистых систем:

– варьированием **подачи** при токарной обработке можно обеспечить изменение напряжений в *характерных* точках до 50 %; при шлифовании – до 30 %;

– при шлифовании изменение **подачи** обеспечивает практически пропорциональное изменение температур в *характерных* точках, подбором технологической жидкости можно обеспечить снижение температур на 17–67 %;

– **способ установки** заготовки на станке практически не влияет на примыкающие слои системы и значим только для слоя, где происходит закрепление.

5. Для типовых конструкций слоистых систем активными ограничениями при токарной обработке является несущая способность системы, при шлифовании – теплостойкость материалов ее слоев.

6. Апробация показала эффективность разработанных практических рекомендаций. Работа на предельных бездефектных режимах резания позволяет повысить производительность операций точения до 47%, операций шлифования – до 20%.

СПИСОК ПЕЧАТНЫХ РАБОТ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

Из 20 работ автора 15 посвящено теме диссертации, из них 3 опубликованы в журналах из перечня ВАК:

1. Шмидт, И.В. Модель напряженного состояния полимерно-композитной слоистой системы при механической обработке резанием / И.В. Шмидт // *Фундаментальные проблемы техники и технологии*. – 2010. – № 4. – С. 46–48.

2. Кошин, А.А. Модель нагрева заготовки при шлифовании слоистой полимерно-композитной системы / А.А. Кошин, И.В. Шмидт // *Фундаментальные проблемы техники и технологии*. – 2011. – № 2/3. – С. 52–57.

3. Кошин, А.А. Систематика ремонтных полимерно-композитных материалов / А.А. Кошин, И.В. Шмидт // *Ремонт, восстановление, модернизация*. – 2010. – №5. – С. 39–45.

Остальные публикации:

4. Шмидт, И.В. Повышение эффективности технологии обработки металлополимерных слоистых систем / И.В. Шмидт // *Будущее машиностроения России: сборник трудов Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов*. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. – С. 41–42.

5. Шмидт, И.В. Особенности температурных полей при шлифовании слоистых систем / И.В. Шмидт // *Проведение научных исследований в области машиностроения: сборник материалов Всероссийской научно-технической конференции с элементами научной школы для молодежи*. Тольятти, 27–28 ноября 2009 г. В 3-х ч. – Тольятти: ТГУ, 2009. – Ч. 2. – С.42–46.

6. Шмидт, И.В. Модель теплофизики шлифования слоистой системы / И.В. Шмидт // *Наука. Технологии. Инновации: Материалы всероссийской на-*

учной конференции молодых ученых в 7-ми частях. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2009. – Ч.1. – С. 156–158.

7. Межотраслевые укрупненные нормативы времени на ремонт и восстановление деталей с использованием полимерно-композитных материалов: переиздание справочника 2003 г. с дополнениями / под ред. док. техн. наук, проф. А.А. Кошина. – Челябинск: Изд-во АТОКСО, 2011. – 586 с.

8. Шмидт, И.В. Технологические особенности финишной обработки слоистых систем с полимерно-композитными материалами / И.В. Шмидт // Высокие технологии, исследования, промышленность. Т. 1: сборник трудов Девятой международной научно-практической конференции «Исследование, разработка и применение высоких технологий в промышленности». – СПб.: Изд-во Политехн. ун-та, 2010. – С. 452–454.

9. Кошин, А.А. Классификация ремонтных полимерно-композитных материалов по технологическим критериям / А.А. Кошин, Г.И. Буторин, И.В. Шмидт // Прогрессивные технологии в машиностроении: сб. науч. тр. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – С. 39–48.

10. Кошин, А.А. Классификация ремонтных полимерно-композитных материалов по эксплуатационным критериям / А.А. Кошин, Г.И. Буторин, И.В. Шмидт // Прогрессивные технологии в машиностроении: сб. науч. тр. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2008. – С. 201–206.

11. Шмидт, И.В. Совершенствование технологии обработки слоистых металлополимерных систем / И.В. Шмидт // Научный поиск: материалы первой научной конференции аспирантов и докторантов. Технические науки. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – С. 187–190.

12. Шмидт, И.В. Расчет эффективных режимов обработки слоистых систем с полимерно-композитными материалами / И.В. Шмидт // Будущее машиностроения России: сборник трудов Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2010. – С. 71–72.

13. Кошин, А.А. Моделирование напряженного состояния полимерно-композитной слоистой системы при механической обработке резанием / А.А. Кошин, С.Б. Сапожников, И.В. Шмидт // Прогрессивные технологии в машиностроении: сб. науч. тр. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2010. – С. 162–169.

14. Шмидт, И.В. Обеспечение бездефектной обработки слоистых систем / И.В. Шмидт // Будущее машиностроения России: сборник трудов Всероссийской конференции молодых ученых и специалистов. – М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2011. – С. 61–63.

15. Шмидт, И.В. Влияние конструкции и режимов резания на напряженное состояние слоистой системы при токарной обработке / И.В. Шмидт // Научный поиск: материалы третьей научной конференции аспирантов и докторантов. Технические науки. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2011. – Т. 2. – С. 90–94.