

05 02 08
П 224

На правах рукописи



Пашнёв Владислав Альевич

ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ШЛИФОВАНИЯ ТРЕХСЛОЙНЫХ МЕТАЛЛ-КОМПОЗИТНЫХ СИСТЕМ

Специальность 05.02.08 — «Технология машиностроения»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

СЛУЖБА ДЕЛОПРОИЗВОДСТВА	
Южно-Уральский государственный	
университет	
вх. № <u>13-18-3032</u>	
< 07 > 11 2005 г.	

Челябинск
2005

Работа выполнена на кафедре «Технология машиностроения»
Южно-Уральского государственного университета.

Научный руководитель: доктор технических наук,
профессор
А.А. Кошин

Официальные оппоненты: Заслуженный деятель
науки и техники РФ,
доктор технических наук,
профессор
Л.В. Худобин

кандидат технических наук,
В.В. Райт

Ведущее предприятие – ОАО НПО «Композит», г. Челябинск

Защита диссертации состоится «4» декабря 2005 г., в 13⁰⁰,
на заседании диссертационного совета Д212.298.06 в Южно-Уральском
государственном университете по адресу: 454080, г. Челябинск,
пр. Ленина, 76, ауд. 201.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке ЮУрГУ.

Автореферат разослан «3» ноября 2005 г.

Ученый секретарь диссертационного совета
доктор технических наук, профессор


И.А. Щуров

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность. Слоистые металл-композитные системы – конструкции из слоев металлов и полимерно-композитных материалов – применяются в наукоемких, так называемых высоких технологиях: космическое машиностроение, авиа- и ракетостроение. Эти системы нашли применение в конструкциях подшипниковых узлов, при создании неподвижных соединений и т.д. Выпускается даже специальная группа полимерно-композитных материалов – фиксаторы. Эти материалы рассчитаны на передачу определенного крутящего момента, и соединение на их базе обеспечивает одновременно и функцию предохранительной муфты. Фиксаторы заменяют посадки с натягом, резьбовые соединения, шпоночные и т.д.

Широкое применение во всех отраслях промышленности, и в первую очередь в metallургии, энергетике, транспорте, горнодобывающих и нефтегазовых отраслях, металл-композитные системы нашли в ремонтных полимерно-композитных технологиях.

Применение полимерно-композитных материалов является радикальным направлением в технологиях восстановления, ремонта и профилактики износа рабочих поверхностей деталей машин. Принципиальным преимуществом полимерно-композитных технологий является простота их реализации. Ремонтные полимерно-композитные материалы (ПКМ) в технологическом состоянии представляют собой пастообразный или жидкий продукт, что обуславливает простоту технологического процесса их нанесения на ремонтируемую поверхность. Полимеризация же, после которой они приобретают конечные свойства, происходит в естественных условиях, не требуя нагрева, создания давления и т. д. Практическое отсутствие усадки после полимеризации обеспечивает высокие точностные показатели восстановленной поверхности и минимальный припуск на финишную обработку. В настоящее время сформировался ряд специализированных предприятий по ремонту и восстановлению рабочих поверхностей с использованием ПКМ.

Зарубежная и отечественная промышленность к настоящему времени освоила выпуск широкую номенклатуру ремонтных ПКМ (свыше 400 марок).

Анализ ремонтных полимерно-композитных технологий, выполненных в специализированных ремонтных организациях Уральского региона и Москвы, показал, что в 75% случаев ремонтов с применением металл-композитных систем в качестве финишной обработки применяется шлифование.

Процесс шлифования сопряжен с силовым и тепловым воздействием на заготовку. Практика показывает, что шлифование металл-композитных систем приводит к целому ряду специфических дефектов (прожоги шлифуемой поверхности, прижоги слоя ПКМ, разрушение целостности слоистой системы). Для исключения появления дефектов в металл-композитной системе при шлифовании на производстве шлифование ведется на заведомо заниженных режимах путем подбора их вручную в процессе шлифования.

**Южно-Уральский
гос. университет
НАУЧНАЯ
БИБЛИОТЕКА**

Таким образом, практика производства требует повышения эффективности шлифования металл-композитных систем и разработки рекомендаций по назначению бездефектных режимов их обработки.

Цель. Повышение эффективности бездефектного шлифования металл-композитных систем.

Для достижения поставленной цели решались следующие **задачи**.

1. Разработать модель напряженного состояния металл-композитной системы при шлифовании ее рабочего слоя;

2. Разработать модель температурного поля металл-композитной системы при шлифовании ее рабочего слоя;

3. Установить связи между показателями полей напряжений и температурного поля, режимами шлифования и дефектами металл-композитной системы;

4. Разработать рекомендации по назначению эффективных бездефектных режимов шлифования металл-композитных систем.

Научная новизна

1. Установлено, что при шлифовании металлического рабочего слоя металл-композитной системы по режимам, рекомендуемым нормативами для металлов, происходит появление дефектов в виде прижогов шлифуемой поверхности, прижогов в слое ПКМ, разрушения монолитности системы.

2. Разработана математическая модель напряженного состояния металл-композитной системы при шлифовании, на основе которой выявлены зависимости напряжений в слое ПКМ от технологических условий обработки и конструкции системы.

3. Разработана математическая модель температурного поля металл-композитной системы при шлифовании, где впервые учтено, как охлаждающее, так и смазывающее действие технологической жидкости. В результате на базе модели:

- выявлено влияние слоистости на характер температурного поля;
- установлено что температурное поле в металл-композитной системе при шлифовании необходимо рассматривать во всем цикле шлифования;
- выявлены критериальные температуры, которые определяют возникновение тепловых дефектов шлифования в металл-композитной системе;

- установлены зависимости критериальных температур от условий обработки и конструкции системы.

4. Предложена система ограничений на режимы по качеству:

- предельная температура шлифуемой поверхности;
- предельная температура на внешней границе слое ПКМ;
- система ограничений по несущей способности слоя ПКМ;
- снижение несущей способности слоя ПКМ при нагреве.

Практическая ценность

1. Рассчитаны напряжения в слое ПКМ металл-композитной системы для типовых конструкций, номенклатуры промышленных ПКМ в диапазоне нагрузок режимов шлифования, которые сведены в альбом (720 полей напряжений).

2. Разработан программный модуль TEMSS, который позволяет рассчитать все характеристики температурного поля в слоях металл-композитной системы в зависимости от конструкции системы, свойств материалов её слоев, режимов шлифования и времени шлифования.

3. Разработаны инженерные методики назначения бездефектных режимов шлифования:

- снижение подачи до уровня обеспечения бездефектности шлифования металл-композитной системы;
- прерывистый цикл шлифования.

Внедрение результатов работы

1. Разработан руководящий технический материал (РТМ) «Шлифование металл-композитных систем», внедренный на ряде промышленных предприятий Уральского региона: ОАО «НПО «Композит», ООО «Обион», ООО «ЧИЗ» (г. Челябинск), ОАО «ЗМЗ» (г. Златоуст).

2. Разработаны карты неполного штучного времени на шлифование металл-композитных систем, включенные в «Межотраслевые нормативы времени на ремонт оборудования с использованием полимерно-композитных материалов». Нормативы утверждены Научно-методическим Советом Центрального бюро нормативов по труду Министерства труда и социального развития РФ и сданы в печать

Апробация работы. Основные положения работы докладывались на научно-технических конференциях в ЮУрГУ (2000, 2001, 2004 гг.), международной конференции (г. Баку — 2005 г.). Результаты работы прошли промышленную апробацию.

Публикации по теме. По теме работы опубликовано 8 печатных работ в виде научных статей.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, пяти глав, заключения, списка литературы (133 наименования) и четырех приложений. Работа изложена на 156 страницах машинописного текста, включает 76 рисунков и 29 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность, практическая значимость работы, сформулированы теоретические предпосылки выполнения исследования.

В первой главе выполнена систематика слоистых систем на базе полимерно-композитных материалов. Слоистая система на базе полимерно-композитных материалов – это конструкция, состоящая из слоев металла и ПКМ. Основу конструкции составляет металл. Рабочие поверхности образуются системой слоев из металлов и полимерно-композитных материалов. Одним из видов слоистых систем является система, когда рабочий слой выполнен из металла, а между ним и основным металлом изделия располагается слой ПКМ. Этот тип слоистых систем на базе ПКМ получил название металл-композитной системы.

Такие системы применяются для ремонта тяжело нагруженных деталей, когда их рабочие поверхности испытывают большие контактные нагрузки. Эти решения применяются при восстановлении изношенных подшипниковых шеек валов прокатных станов, шпинделей металлорежущих станков и т.д.

В настоящее время сформировался ряд специализированных предприятий по ремонту и восстановлению рабочих поверхностей с использованием ПКМ: ОАО ММК «Мосинтраст» и ОАО «Лео» (г. Москва), ООО «Велон» (г. Екатеринбург), ОАО «Парма Сервис» (г. Магнитогорск), ОАО НПО «Композит» (г. Челябинск) и т.д.

К настоящему времени на мировом рынке промышленных ПКМ насчитываются около 400 марок как зарубежных («Belzona», «Multimetall», «Diamant», «Loc-tite», «Devcon», «Unirep» и т.д.), так и отечественных («Лео», «Chester molecular», «Десан», «Полирем», «Реком» и т.д.).

При проектировании ремонтных технологий с использованием ПКМ необходимо сопоставлять физико-механические свойства конструкционного материала со свойствами ПКМ. По прочности промышленные ПКМ уступают конструкционным материалам – сталим и сплавам. Кроме того, прочностные свойства ПКМ зависят от способа приложения нагрузки. Предел прочности ПКМ при сжатии превышает предел прочности при растяжении в 5 раз. Предел прочности при отрыве ПКМ от стали в 10 раз меньше, чем его предел прочности при растяжении.

Тепловые свойства ПКМ отличаются от тепловых свойств конструкционных материалов: теплоемкость в 30 раз меньше чем у стали; теплопроводность по сравнению с черными металлами меньше в 2,5 – 4 раза, с цветными – в 100 раз.

Промышленные ПКМ имеют порог теплостойкости, который составляет 100–230 °С. Кроме того, ряд ПКМ имеет падающую температурно-прочностную характеристику.

Финишная обработка металл-композитных систем, как правило, включает процессы шлифования. Анализ ремонтных технологий на предприятиях Уральского региона и Москвы показал, что при шлифовании рабочего слоя металл-композитной системы по режимам, рекомендуемых нормативами для шлифуемо-

го металла, возникает ряд специфических дефектов: прижог шлифуемого металла, деструкция полимерно-композитного материала, отслоение или разрушение полимерно-композитного слоя. Поэтому на практике работают на сильно заниженных режимах шлифования, которые подбирают экспериментально.

Таким образом, низкий порог теплостойкости и прочностные характеристики ПКМ могут являться сдерживающими факторами при назначении режимов шлифования.

Для разработки рекомендаций по бездефектным режимам шлифования металл-композитной системы необходимо в первую очередь решение двух задач: анализ напряженного состояния и температурного поля в слоистой системе при шлифовании её внешнего слоя.

Фирмой Loctite предложены модели расчета статического усилия выпрессовки и крутящего момента для цилиндрических клеевых соединений. Модели работают для тонких слоев ПКМ и симметричной нагрузки, что далеко от схемы нагружения при шлифовании.

Нагрузка при шлифовании прикладывается локально, и рабочий слой в металл-композитной системе работает подобно балке на упругом основании, когда кроме сжимающих возникают и растягивающие напряжения. Поскольку предел прочности ПКМ при растяжении в 10 раз меньше, чем при сжатии, возникают предпосылки разрушения ПКМ по растягивающим напряжениям. Модели балки на упругом основании описывают перемещение балки. В нашем же случае интерес представляет напряженное состояние полимерно-композитного слоя, то есть упругого основания балки. Поэтому такую задачу необходимо ставить, исходя из общих положений теории упругости.

Теплофизика процесса шлифования весьма проработана. Существует множество математических моделей, описывающих температурное поле при шлифовании для монолитных деталей (П.И. Ящерицын, С.Г. Редько, В.А. Сипайлов, А.В. Подзей, А.В. Якимов, С.Н. Корчак и др.). Д.Е. Анельчиком разработана температурная модель для деталей с покрытиями. Её можно применить для двухслойных систем. Решений для более сложных систем, в том числе, металл-композитных, не обнаружено.

Анализ известных методик назначения режимов шлифования показал, что всегда включается ограничение по прижогу шлифуемой поверхности. П.П. Пере-верзевым сформирована полная система ограничений при шлифовании монолитных деталей. Д.Е. Анельчиком показано, что при шлифовании покрытий необходимо ввести дополнительное ограничение по температуре на границе покрытия и подложки. Следовательно, для металл-композитных систем необходимо вводить ограничения на режимы, отражающие специфику образования дефектов в них.

Вторая глава посвящена исследованию напряженного состояния трехслойной металл-композитной системы при шлифовании её рабочего слоя.

Шлифование цилиндрических металлокомпозитных систем, в основном, производится по схеме круглого наружного врезного шлифования с радиальной подачей.

Напряженное состояние системы в этом случае формируется в результате силового воздействия шлифовального круга на заготовку составляющими силы резания P_z и P_y (рис. 1).

Для такой схемы нагружения можно в соответствии с фундаментальными положениями теории упругости ставить известную плоскую контактную задачу теории упругости для системы трех тел при внешней нагрузке.

Описание деформируемого объекта в этой задаче сводится к заданию формы и размеров контактирующих тел и указанию контактных поверхностей. В полярных координатах система трех тел, в соответствии с расчетной схемой (см. рис. 1), описывается соотношениями:

первое тело – $\{0 \leq \varphi \leq 2\pi; R_1 \leq r \leq R_2\}$;

второе тело – $\{0 \leq \varphi \leq 2\pi; R_2 \leq r \leq R_3\}$;

третье тело – $\{0 \leq \varphi \leq 2\pi; R_3 \leq r \leq R_4\}$.

Условия контакта тел:

$$\text{контакт между первым и вторым телом} \quad \left\{ \begin{array}{l} u_1|_{r=R_2} = u_2|_{r=R_2} \\ v_1|_{r=R_2} = v_2|_{r=R_2} \end{array} \right. ;$$

$$\text{контакт между вторым и третьим} \quad \left\{ \begin{array}{l} u_2|_{r=R_3} = u_3|_{r=R_3} \\ v_2|_{r=R_3} = v_{32}|_{r=R_3} \end{array} \right. .$$

Условие равновесия обеспечивает реакция центров, которую задаем в виде фиксации в пространстве окружности контакта центров с заготовкой: $u|_{r=R_4} = 0$.

Описание приложенной нагрузки сводится к заданию напряжений на внешней границе:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sigma_r = P_y \\ \sigma_\varphi = P_x \end{array} \right. \text{при } r = R_1; -\alpha \leq \varphi \leq \alpha \\ \sigma_r = \sigma_\varphi = 0 \text{ при } r = R_1; \varphi \notin [-\alpha; \alpha].$$

Ввиду сложности задачи и отсутствия аналогов принято целесообразным для решения в первом приближении, то есть для выявления характера влияния слоистости на напряженное состояние, использовать компьютерные технологии решения, опираясь на известные программные продукты. Установленный в Вы-

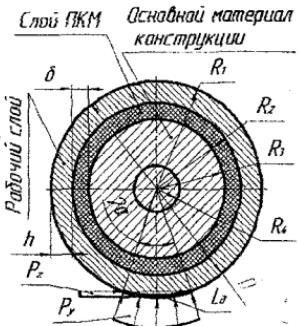


Рис. 1. Схема нагружения шлифуемой заготовки

числительном Центре ЮУрГУ пакет прикладных программ ANSYS, реализующий метод конечных элементов, позволяет решать задачи подобного уровня.

Действие сил в слоистой системе распространяется через слои без потерь. В среде ANSYS для задания таких объектов используется операция склеивания объектов. Поэтому трехслойную систему можно рассматривать как единый объект с различными физико-механическими характеристиками в слоях, которые соответствуют материалу вала, ПКМ и материалу рабочего слоя.

При разбиении на конечные элементы принята нерегулярная сетка: мелкая в рабочем слое и в слое ПКМ и крупная в зоне основного материала. Тип конечных элементов – Plane 42, плоский, 4-х узловой с двумя степенями свободы.

Результатами расчетов являются поля напряжений $\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{xy}, \sigma_{xx}$, описанные линиями уровня, каждая из которых выделена своим цветом (рис. 2).

По разработанной модели произведен расчет напряжений в полимерно-композитном слое для типовых конструкций металл-композитных систем в диапазоне деформационных свойств промышленных ПКМ и в интервале нагрузок шлифования. Полученные в результате расчетов 720 типовых полей напряжений ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{xy}, \sigma_{xx}$) оформлены в виде альбома и приведены в приложении к диссертации.

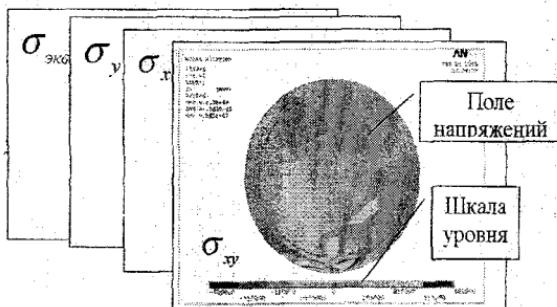


Рис. 2. Поле напряжений в металл-композитной системе

Анализ этих типовых полей показал, что распределение напряжений по слоям существенно зависит от конструкции системы, свойств ПКМ и прилагаемой нагрузки. При этом установлено, что в металл-композитной системе проявляется эффект балок на упругом основании, то есть кроме зоны максимальных сжимающих напряжений, расположенной в окрестности точки приложения сил резания, формируется ряд зон максимумов растягивающих напряжений, которые распределены по рабочему кольцу и кольцу полимерно-композитного слоя.

Посредством выявления максимальных значений напряжений в слое ПКМ на рассчитанных полях ($\sigma_x, \sigma_y, \sigma_{xy}, \sigma_{xx}$) установлены зависимости этих значений от модуля упругости ПКМ, конструкции металл-композитной системы и силы резания P_y . При этом отдельно рассматривались максимумы сжимающих и растягивающих напряжений. На рис.3 приведены примеры этих зависимостей.

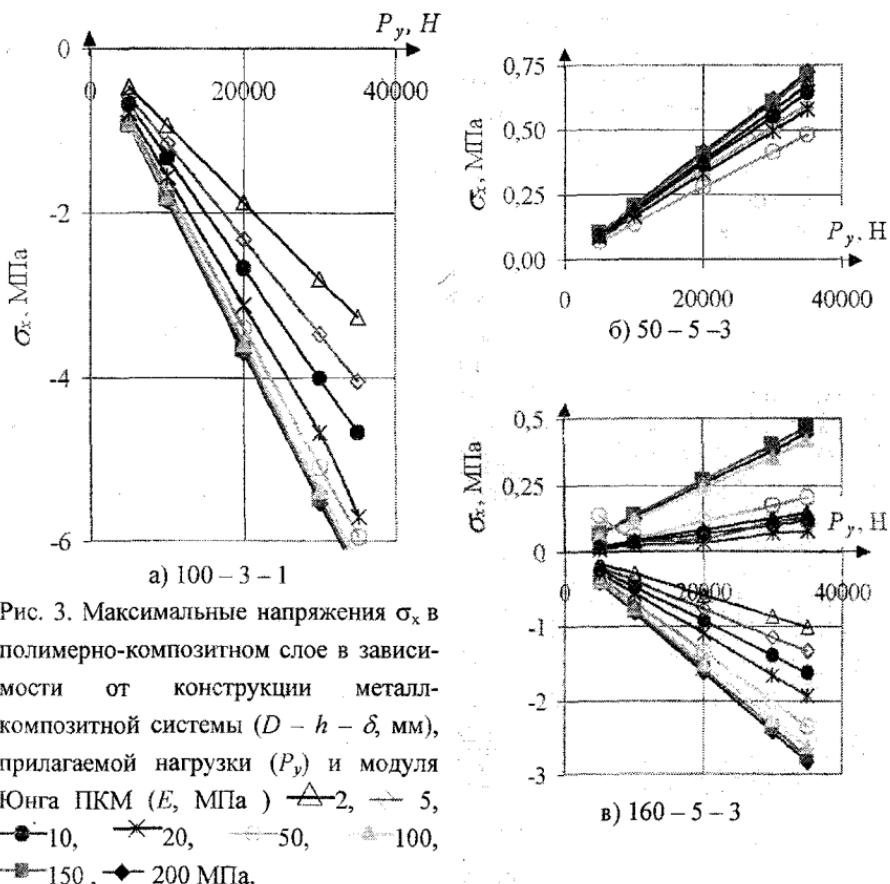


Рис. 3. Максимальные напряжения σ_x в полимерно-композитном слое в зависимости от конструкции металлокомпозитной системы ($D - h - \delta$, мм), прилагаемой нагрузки (P_y) и модуля Юнга ПКМ (E , МПа) $\triangle - 2$, $- 5$, $\bullet - 10$, $\times - 20$, $\circ - 50$, $\diamond - 100$, $\blacksquare - 150$, $\blacklozenge - 200$ МПа.

Установлено, что при увеличении модуля упругости ПКМ с 2 до 200 МПа, при равных конструктивных и технологических условиях, максимальные сжимающие напряжения σ_x увеличиваются в 1,5...2 раза, растягивающие – в 1,2...1,5 раза. Максимальные сжимающие напряжения σ_y увеличиваются в 1,6...2,5 раза, растягивающие – в 1,3...1,5. Силы резания существенно влияют на напряжения в полимерно-композитном слое. Увеличение P_y в 7 раз приводит к возрастанию максимальных сжимающих напряжений σ_x в 2...4,2 раза, растягивающих – в 1,8...3,8 раза. Максимальные сжимающие напряжения σ_y увеличиваются в 2,2...3,4 раза. Увеличение толщин рабочего (до 8 мм) и полимерно-композитного

(до 5 мм) слоев приводит к снижению максимальных напряжений как сжимающих, так и растягивающих в 2,5 раза.

В итоге установлено, что в диапазоне нормативных режимов шлифования в полимерно-композитном слое металл-композитной системы при шлифовании её рабочего слоя могут возникнуть напряжения, превышающие предельно допустимые для промышленных полимерно-композитных материалов.

В третьей главе разработана математическая модель теплопередачи в слоистой системе при шлифовании её рабочего слоя и проведен анализ температурных полей в трехслойных металл-композитных системах.

Для круглого врезного шлифования общепринятой является расчетная схема, когда действие шлифовального круга заменяется тепловым источником мощности q , распределенным по дуге контакта. За пределами действия теплового источника происходит отвод тепла в технологическую жидкость с коэффициентом теплоотдачи α . Распространение же тепла происходит в среде, врачающейся с угловой скоростью ω .

Этот процесс описывается дифференциальным уравнением теплопроводности с конвективным членом. Переходом в подвижную систему координат задачи такого типа в теплофизике шлифования традиционно сводится к одномерной задаче теплопроводности в полубесконечном стержне. Чередование действия теплового источника и отвода тепла в технологическую жидкость описывается как функция времени, т.е. ставится смешанная краевая задача.

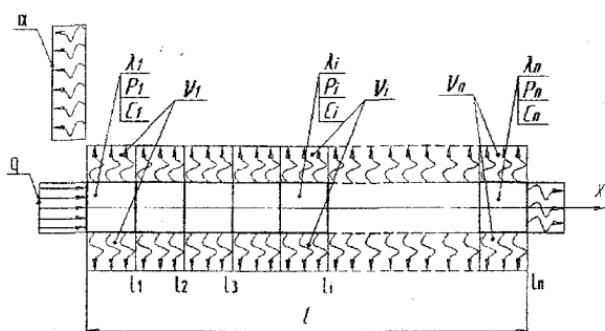


Рис. 4. Расчетная схема теплопередачи в слоистой системе

ем сечения заготовки в зоне шлифования или вне её.

Для учета рассеивания тепла в тело заготовки на каждом i -м слое введены боковые отводы тепла v_i . Уравнение теплопроводности для данной схемы примет вид: $C_i \rho U_i = \lambda_i U_{i+1} - v_i U_i$ $x \in [0, l_i]$. Начальное условие: $U_i(x, 0) = 0$. Краевые условия: на левом конце стержня ($x=0$) задано объединенное условие

По аналогии с этим для теплопроводности в слоистой системе принята одномерная расчетная схема (рис. 4). Задача ставится на стержне конечной длины l . Стержень разбит на n частей, каждая из которых имеет свои теплофизические свойства. Источник q и теплоотдача α распределены во времени в соответствии с нахождени-

$\lambda U_x(0,t) = i\alpha U(0,t) - (1-i)q(t)$, описывающее при $i=1$ действие источника q и теплоотдачу α при $i=0$; на правом конце поставлено дополнительное условие третьего рода (теплоотдача интенсивностью α_e вглубь заготовки) $\lambda U u_x(l,t) = -\alpha_e U(l,t)$. Техофизические константы $C_i, \rho_i, \lambda_i, \nu_i$ считаются кусочно-постоянными на каждом интервале (x_i, x_{i+1}). Такая обобщенная постановка описывает процесс теплоизлучения в слоистой системе из n слоев.

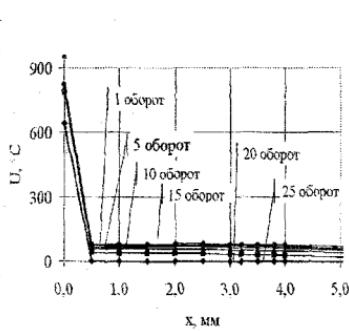
Решение этой смешанной краевой задачи проведено методом конечных элементов с использованием квадратичной интерполяции. Для реализации полученной в итоге неявной численной схемы разработан специальный программный модуль TEMSS. Результаты работы модуля — массив значений температур и эпюры температур по глубине заготовки в текущий момент времени.

В рамках проверки адекватности разработанной модели проведена оценка её соответствия известным решениям теплофизики шлифования для монолитных заготовок. Разница полученных температур не превысила 10%.

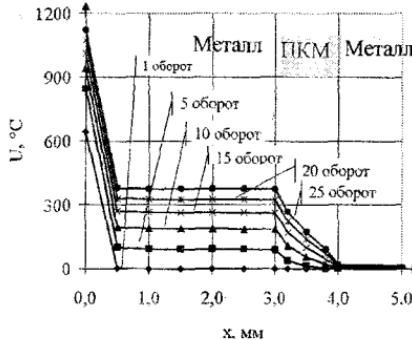
Адекватность учета слоистости системы проверена экспериментально. Шлифовались образцы с двумя искусственными термопарами на верхней и нижней границах слоя ПКМ. Разница температур на границе слоя ПКМ, полученных экспериментальным и расчетным путем, также не превысила 10%.

С использованием разработанного программного модуля проведен комплексный анализ температурных полей для типовых металлы-композитных систем, номенклатуры промышленных ПКМ и диапазона нагрузок (порядка 1500 полей).

Установлен такой факт: за первый оборот заготовка, нагретая в зоне шлифования, не успевает полностью охладиться. Действие источника на втором обороте накладывается на остаточную температуру от первого оборота. Таким образом, оценку температурных полей необходимо проводить с учетом цикла шлифования. Примеры температурных полей в монолитной детали и слоистой системе за цикл шлифования представлены на рис. 5. и рис. 6.

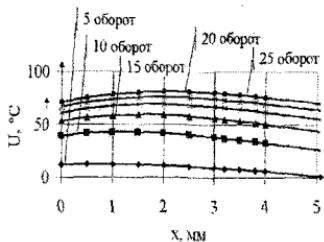


а) Стальная заготовка

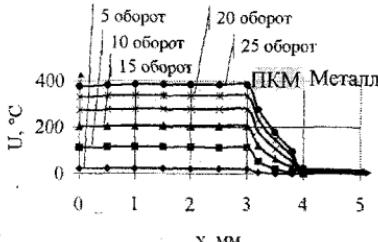


б) Металл-композитная система

Рис. 5. Температурное поле в момент выхода из зоны шлифования (нагрев)



а) Стальная заготовка

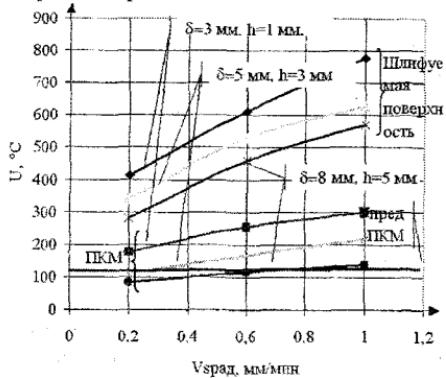


б) Металл-композитная система

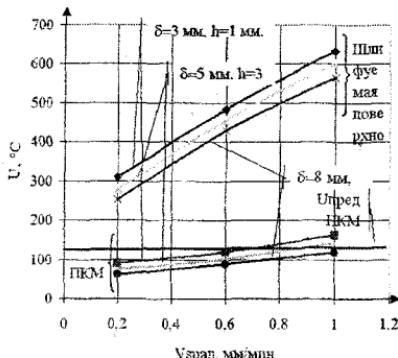
Рис. 6. Температурное поле в момент входа в зону шлифования (охлаждение)

Исходя из конечной цели исследования – обеспечения бездефектности шлифования металл-композитных систем, на температурных эпюрах выделены особые точки, определяющие появление тепловых дефектов. Эти точки названы критериальными температурами. Первая критериальная температура – температура на шлифуемой поверхности при выходе из зоны шлифования; вторая – температура на внешней границе слоя ПКМ в момент входа в зону шлифования.

На основании рассчитанных температурных полей построены зависимости влияния технологических условий шлифования (мощность теплового источника, способ подачи технологической жидкости) и конструктивных параметров металл-композитной системы (толщины слоев системы, группа материала полимерно-композитного слоя) на критериальные температуры, примеры которых приведены на рис. 7 и рис. 8.



а) 1 группа ПКМ



б) 3 группа ПКМ

Рис. 7. Влияние интенсивности шлифования металл-композитной системы на критериальные температуры при подаче технологической жидкости высоконапорной струей

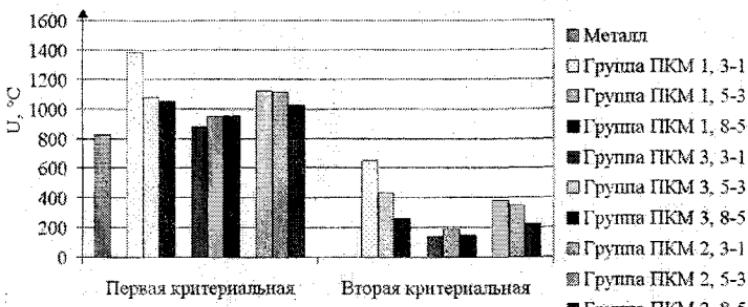


Рис. 8. Влияние конструкций металлы-композитной системы на критериальные температуры

При исследовании влияния технологической жидкости на температуру в металлы-композитной системе учтены как охлаждающее действие жидкости через теплоотдачу α (по данным А.Н. Резникова), так и смазывающее действие, которое учтено через мощность шлифования (по данным А.В. Леонова). Охлаждающее действие снижает температуру шлифуемой поверхности в металлы-композитной системе на 25%; смазывающее – до 17%.

В итоге установлено, что при шлифовании рабочего стального слоя металлы-композитной системы на нормативных режимах для стальных заготовок, как правило, температуры в рабочем и полимерно-композитном слое превышают предельные для материалов этих слоев.

Четвертая глава посвящена разработке научно-обоснованного метода расчета бездефектных режимов шлифования металлы-композитных систем.

При назначении режимов механической обработки, как правило, учитывается ряд ограничений, в том числе и по качеству. Так в Общемашиностроительных нормативах режимов шлифования заложено ограничение по прижогу шлифуемой поверхности.

Как показывают результаты исследований напряженного состояния и температурных полей при шлифовании металлы-композитных систем, при назначении режимов шлифования этих систем необходимо добавить к традиционному ограничению по прижогу шлифуемой поверхности ряд дополнительных ограничений:

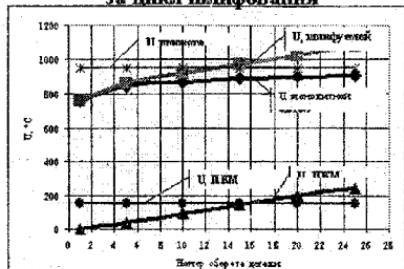
- совокупность ограничений по несущей способности полимерно-композитного слоя;
- ограничение по предельной температуре ПКМ;
- ограничение по снижению несущей способности слоя ПКМ при нагреве.

В работе предложена единая схема учета активности введенных ограничений (рис. 9).

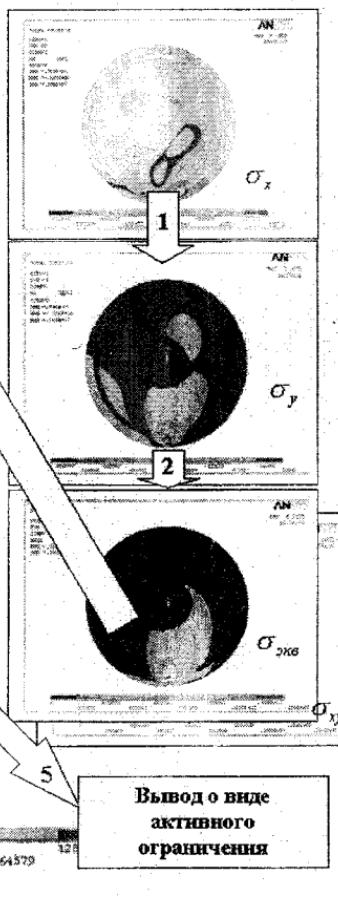
Производится анализ полей напряжений ($\sigma_x, \sigma_{xy}, \sigma_y, \sigma_{yy}$), взятых из альбома типовых полей, или рассчитанных по разработанной модели, и проверяется, не

превышают ли максимумы напряжений предельно допустимых значений для ПКМ.

**Температурное поле
металл–композитной системы
за цикл шлифования**



Поля напряжений



**Температуры опасного
оборота цикла
шлифования нанесенные
на поле напряжений**

**Вывод о виде
активного
ограничения**

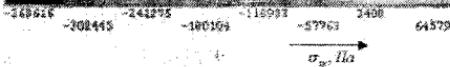


Рис. 9. Схема учета ограничений

Из температурного поля заготовки за цикл шлифования, взятого из типовых расчетов, или рассчитанного по разработанной модели, проверяется, не превышают ли критериальные температуры предельно допустимых значений для материалов рабочего и полимерно-композитного слоев.

Если ПКМ имеет падающую прочностную характеристику, производится сравнение максимумов полученных напряжений с предельными значениями для данного материала при температуре его нагрева.

Проведенный в работе анализ показал, что при шлифовании стального рабочего слоя металл-композитной системы по нормативным режимам для стальных заготовок при разных вариантах конструкций системы и имеющейся номенклатуре марок ПКМ возможна активизация любого из введенных дополнительных ограничений. Поэтому для бездефектного шлифования металл-композитных систем необходимо изыскать пути снижения тепловой и силовой напряженности процесса.

В работе предложены два направления в обеспечении бездефектности.

Первое направление – снижение мощности теплового источника q , за счет уменьшения подачи V_{Spad} . Это приводит к уменьшению времени действия теплового источника на каждом обороте. Но так как снимаемый припуск остается постоянным, то со снижением подачи V_{Spad} увеличивается время цикла шлифования. В главе 3 показано, что с увеличением длительности цикла шлифования возрастают и критериальные температуры. Поэтому влияние снижения подачи на нагрев шлифуемой заготовки имеет сложный характер.

Расчеты показали, что за счет уменьшения подачи, при соответствующем подборе способа подачи технологической жидкости, можно добиться снижения критериальных температур до предельных.

Этот путь сопряжен с потерей производительности, причем в некоторых случаях (для полимерно-композитных материалов типа Loctite) потеря весьма существенна (до 10 раз).

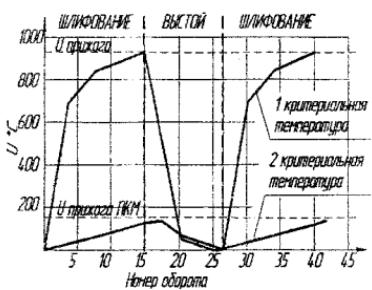


Рис. 11. Изменение температуры в металл-композитной системе за ступенчатый цикл шлифования

отвода шлифовального круга (отключение теплового источника). Оно существенно зависит от способа подачи технологической жидкости (рис. 12).

Прерывистые циклы при шлифовании металл-композитных систем более эффективны, так как при этом сохраняются режимы обработки, рекомендуемые нормативами для стальных заготовок.

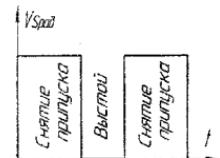
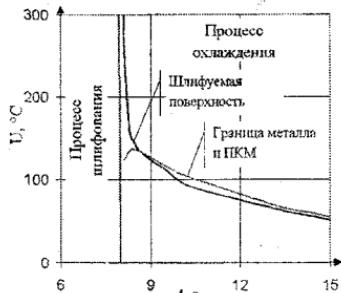


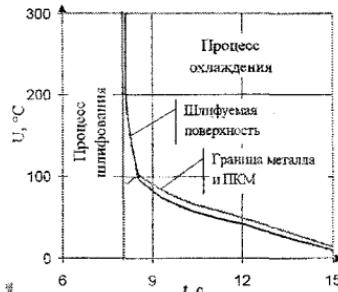
Рис. 10. Прерывистый цикл шлифования

Второй путь – организация прерывистого цикла шлифования, т.е. деление основного цикла на этапы с организацией выстоя между ними (рис. 10). Время выстоя – это время охлаждения, когда температура на шлифуемой поверхности и внешней границе слоя ПКМ снижается до уровня, при котором наложение температур при следующем рабочем этапе цикла не приводит к превышению критериальными температурами своих предельных значений (рис. 11).

Время выстоя рассчитывается по интенсивности охлаждения заготовки после отвода шлифовального круга (отключение теплового источника). Оно существенно зависит от способа подачи технологической жидкости (рис. 12).



а) Полив



б) Высоконапорной струей

Рис. 12. Остывание металл-композитной системы
($D=160$; $h=5$, $\delta=3$; ПКМ – Devcon C-1) после отключения теплового источника
для разных способов подачи технологической жидкости

В главе 5 разработаны инженерные рекомендации по назначению бездефектных режимов шлифования металл-композитных систем.

В рамках практической реализации первого направления по обеспечению бездефектности шлифования стального рабочего слоя металл-композитных систем предложен поправочный коэффициент на нормативную подачу. В табл. 1 приведены его значения, рассчитанные для типовых конструкций металл-композитных систем, групп ПКМ и способов подачи технологической жидкости.

Для реализации второго направления проведен анализ возможных вариантов организации прерывистых циклов шлифования для типовых конструкций металл-композитных систем и групп ПКМ. В итоге установлено, что достаточно двух выстоев, т.е. прерывистый цикл может содержать три рабочих этапа и два промежуточных выстоя. В табл. 2 приведены рассчитанные времена каждого из этапов прерывистого цикла для типовых металл-композитных систем и групп ПКМ. Режимы обработки в данном случае назначаются по Общемашиностроительным нормативам для шлифуемого металла. Разработанные рекомендации по бездефектным режимам шлифования металл-композитных систем оформлены в виде руководящих технических материалов. РТМ внедрены на специализированных ремонтных предприятиях Уральского региона, работающих по полимерно-композитным технологиям, и ряде машиностроительных предприятий.

Кроме того, разработаны карты на неполное штучное время на операции шлифования металл-композитных систем, которые вошли в «Межотраслевые нормативы времени на ремонт оборудования с использованием полимерно-композитных материалов», впервые разработанные кафедрой «Технология машиностроения» ЮУрГУ совместно ОАО НПО «Композит» под методическим руководством Центрального бюро нормативов по труду.

Таблица 1

Поправочный коэффициент $K_{\nu_{\text{сп}}}$

для шлифования металл-композитных систем (фрагмент карты)

Конструкция системы	D , мм	n_0 , об/мин	$2P$, мм	Группа ПКМ					
				I	II	III			
Подача технологической жидкости высоконапорной струей									
Поправочный коэффициент $K_{\nu_{\text{сп}}}$									
$h=3$ мм; $\delta=1$ мм	50	130	0,15	0,0023	0,0648	0,576			
		160	0,5	0,0031	0,081	0,72			
		197	1,0	0,0035	0,09	0,792			
	100	88	0,3	0,0026	0,072	0,64			
		110	0,5	0,0034	0,09	0,8			
		130	1,0	0,0039	0,1	0,88			
	160	67	0,3	0,0029	0,0792	0,704			
		82	0,5	0,0037	0,099	0,88			
		100	1,0	0,0043	0,11	0,968			

Таблица 2

Рекомендации по этапам прерывистого цикла (фрагмент карты)

D , мм	n_0 , об/мин	$2P$, мм	Конструкция металл-композитной системы (h, δ)							
			5, 3	8, 5	5, 3	8, 5	5, 3	8, 5		
Группа ПКМ						1	2	3		
Коэффициенты на времена этапов цикла $K_{t_1}; K_{t_{\text{выстой}}}; K_{t_2}; K_{t_3}$										
50	130	0,15	0,3; 0,27; 0,4; 0,3	0,5; 0,33; 0,5	0,7; 0,18; 0,3					
	160	0,5	0,3; 0,2; 0,4; 0,4	0,5; 0,33; 0,5	0,7; 0,3; 0,3					
	197	1,0	0,3; 0,25; 0,4; 0,3	0,5; 0,33; 0,5	0,7; 0,34; 0,3					

В заключении приведены основные научные и практические результаты и выводы.

1. Установлено что при шлифовании внешнего стального (рабочего) слоя металл-композитной системы по режимам, назначенным по рекомендациям для сталей и сплавов, возникают дефекты в виде прижога шлифуемого стального слоя, а так же в виде разрушения или перегрева лежащего ниже полимерно-композитного слоя.

2. Теоретически и экспериментально доказана выдвинутая гипотеза об определяющей роли в дефектообразовании металл-композитной системы при шлифовании её рабочего слоя процессов деформационного и теплового взаимодействия слоев системы.

3. Разработанная математическая модель напряженного состояния металлокомпозитной системы при шлифовании рабочего слоя системы, позволила, с использованием программной среды ANSYS, выявить влияние конструкции системы, деформационных свойств материалов её слоев и условий шлифования на напряжения, определяющие несущую способность системы.

Установлено, что кроме зоны максимальных сжимающих напряжений в окрестности точки приложения сил резания, формируется ряд зон растягивающих напряжений, которые распределены по рабочему кольцу и кольцу слоя полимерно-композитного материала системы.

4. Разработанная математическая модель температурного поля в металлокомпозитной системе при шлифовании её рабочего слоя адекватно учитывает различные теплофизические характеристики материалов слоев системы и, реализованная в виде программного модуля TEMSS, позволяет рассчитывать характеристики температурного поля в слоях системы в зависимости от режимов и времени шлифования, а так же впервые учесть охлаждающее и смазывающее действия технологической жидкости.

5. Теоретически установлено, что при известных способах подачи технологической жидкости тепловое воздействие зоны шлифования на следующем обороте накладывается на остаточное температурное поле от предыдущего оборота заготовки и поэтому наряду с мощностью теплового источника (мощностью шлифования), большое влияние на величины температур оказывает время шлифования, т. е. длительность цикла.

6. Анализ полей напряжений и температурных полей в металлокомпозитных системах при шлифовании их рабочих слоев показал, что при нормативных режимах шлифования напряжения в слое ПКМ могут превышать а температуры в шлифуемом материале и полимерно-композитном слое как правило превышают предельные значения для материалов этих слоев.

7. Альбом полей напряжений для типовых конструкций металлокомпозитных систем в сочетании с разработанным программным модулем TEMSS, позволяющим рассчитывать температурные поля для любого набора исходных данных, составляют базу расчетного метода определения бездефектных режимов шлифования металлокомпозитных систем.

8. На базе введенных дополнительных ограничений на режимы шлифования, отражающих механизм образования шлифовочных дефектов в металлокомпозитных системах, и расчете критериальных температур предложены два направления обеспечения бездефектности шлифования:

- предельный двухэтапный нормативный цикл со снижением подачи до бездефектного уровня;

- прерывистый ступенчатый цикл с нормативной подачей для шлифуемого материала.

9. Научные результаты по обеспечению бездефектности шлифования металлокомпозитных систем доведены до уровня инженерных методик и оформлены в виде руководящих технических материалов, внедренных на ряде предприятий.

10. Апробация показала эффективность разработанных практических рекомендаций. Работа по предельному нормативному циклу с подачей, сниженной до бездефектного уровня, позволяет повысить производительность операций шлифования металл-композитных систем на 25 – 200%. Работа по прерывистому циклу, которую можно организовать на станках с ЧПУ, имеет резерв повышения производительности до 800%.

11. Годовой экономический эффект от внедрения рекомендаций составил 400 тыс. рублей.

СПИСОК ПЕЧАТНЫХ РАБОТЫ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ

1. Кошин А.А., Пашиев В.А. Алгоритмизация нормирования ремонтных технологических процессов на базе полимерно-композитных материалов // Прогрессивные технологии в машиностроении: Сб. научн. тр. — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2002. — С. 20–23.
2. Кошин А.А., Пашиев В.А. Разработка классификатора операций и переходов ремонтных технологических процессов на базе полимерно-композитных материалов // Прогрессивные технологии в машиностроении: Сб. научн. тр. — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2002. — С. 23–26.
3. Кошин А.А., Пашиев В.А., Геренштейн А.В. Математическая модель температурного поля в системе вал–полимерно-композитное покрытие–ремонтное кольцо при финишной обработке // Прогрессивные технологии в машиностроении: Сб. научн. тр. — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2003. — С. 88–93.
4. Кошин А.А., Пашиев В.А., Геренштейн А.В. Математическая модель напряженного состояния и деформаций системы вал–полимерно-композитное покрытие–ремонтное кольцо при внешней нагрузке // Прогрессивные технологии в машиностроении: Сб. научн. тр. — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2003.—С. 83–88.
5. Кошин А.А., Пашиев В.А. Анализ напряженного состояния трехслойных металл-композитных систем при шлифовании // Прогрессивные технологии в машиностроении: Сб. научн. тр. — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. — С. 146–154.
6. Кошин А.А., Пашиев В.А. Особенности шлифования трехслойных металл-композитных систем // Абразивное производство: Сб. научн. тр. / Ред. колегия: Б. А. Чаплыгин (отв. ред.) и др.– Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. — С. 79–84.
7. Кошин А.А., Пашиев В.А., Дьяконов А.А. Исследование обрабатываемости полимерно-композитных покрытий при шлифовании // Абразивное производство: Сб. научн. тр. / Ред. колегия: Б. А. Чаплыгин (отв. ред.) и др.– Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. — С. 73–79.
8. Кошин А.А., Пашиев В.А., Дьяконов А.А. Исследование работоспособности шлифовальных кругов при обработке ремонтных полимерно-композитных покрытий // Абразивное производство: Сб. научн. тр. / Ред. колегия: Б. А. Чаплыгин (отв. ред.) и др. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2004. — С. 84–90.

Пашнёв Владислав Альевич

**ПОВЫШЕНИЕ ЭФФЕКТИВНОСТИ ШЛИФОВАНИЯ
ТРЕХСЛОЙНЫХ МЕТАЛЛ-КОМПОЗИТНЫХ СИСТЕМ**

Специальность 05.02.08 — «Технология машиностроения»

АВТОРЕФЕРАТ
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Издательство Южно-Уральского государственного
университета

Подписано в печать 26.10.2005. Формат 60×84 1/16. Печать офсетная.

Усл. печ. л. 1,16. Уч.-изд.л.1.

Тираж 100 экз. Заказ 342.

УОП Издательства 454080, Челябинск, пр. им. В.И. Ленина, 76.