На правах рукописи

Петренко Константин Петрович

СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ПРОЦЕССОВ ППД НА ОСНОВЕ УЧЕТА ТЕХНОЛОГИЧЕСКОГО НАСЛЕДОВАНИЯ ПРИ МЕХАНИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКЕ

05.02.07 – Технология и оборудование механической и физико-технической обработки

Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
кандидата технических наук

Новосибирск – 2010

Работа выполнена в Государственном образовательном учреждении
высшего профессионального образования
«Кузбасский государственный технический университет», г. Кемерово

Научный руководитель: доктор технических наук, профессор Блюменштейн Валерий Юрьевич

Официальные оппоненты:

доктор технических наук, профессор Тамаркин Михаил Аркадьевич

кандидат технических наук, доцент Гилета Виктор Павлович

Ведущая организация ГОУ ВПО «Московский государственный технический университет» (МГТУ «МАМИ»), г. Москва

Защита состоится 8 декабря 2010 г. в 16 часов на заседании диссертационного совета Д 212.173.07 при ГОУ ВПО «Новосибирский государственный технический университет» по адресу: 630092, г. Новосибирск, пр. К.Маркса, 20.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Новосибирского государственного технического университета.

Автореферат разослан «3» ноября 2010 г.

Ученый секретарь
диссертационного совета,
кандидат технических наук, доцент Никитин Ю. В.

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Важнейшей задачей современного машиностроительного производства является обеспечение долговечности деталей машин, которая в значительной степени определяется качеством поверхностного слоя (ПС). В настоящее время очевидным является факт, согласно которому проектирование упрочняющих технологических процессов необходимо проводить с учетом явления технологического наследования (ТН). Это означает учет накопления свойств поверхностного слоя на всех операциях обработки и при последующей эксплуатации изделия.

Анализ показал, что ТН – сложное явление, описываемое комплексом взаимосвязей между режимами, параметрами качества и эксплуатационными характеристиками изделия.

Недостаточный учет физических представлений о механизме наследования не позволяет в полной мере учитывать явление ТН при проектировании упрочняющих технологических процессов с позиций получения заданной долговечности.

В соответствии с положениями механики ТН формирование и трансформация свойств поверхностного слоя на стадиях механической обработки и эксплуатации происходит в условиях непрерывного накопления деформации и исчерпания запаса пластичности металла поверхностного слоя. В процессах механической обработки резанием и поверхностным пластическим деформированием (ППД) в зоне контакта инструмента с деталью возникает область пластического течения – очаг деформации (ОД), характеризующийся определенным напряженно-деформированным состоянием (НДС). В ОД вдоль линий тока происходит накопление деформации, исчерпание запаса пластичности металла и формирование свойств поверхностного слоя.

Помимо традиционных показателей качества в механике ТН используются интегральные механические характеристики состояния металла: степень деформации сдвига Λ, степень исчерпания запаса пластичности Ψ, тензор остаточных напряжений $\left\lfloor \boldsymbol{T}_{\sigma_{ост}} \right\rfloor$ и др. Ключевым механизмом механики ТН являются программы нагружения (ПН) поверхностного слоя на стадиях обработки и эксплуатации. ПН – это зависимость накопленной степени деформации сдвига Λ от показателя напряженного состояния $\boldsymbol{\Pi}$. ПН формируются под влиянием ранее накопленной поверхностным слоем деформации, что с позиции механики ТН отражает историю нагружения (ИН), с позиции технологии – технологическое наследование.

К настоящему времени получено описание ПН на стадиях резания и ППД, однако требуют уточнения вопросы влияния параметров ОД, режимов и наследственности на формирование качества поверхностного слоя под воздействием программ нагружения.

С учетом возрастающих требований к качеству и долговечности изделий данная работа, направленная на повышение эффективности проектирования упрочняющих технологических процессов, формирующих заданные свойства

поверхностного слоя, с позиций наследственных программ нагружения, является актуальной.

Цель работы

Повышение эффективности проектирования упрочняющих технологических процессов ППД на основе раскрытия наследственных закономерностей формирования и трансформации программ нагружения поверхностного слоя.

Для достижения поставленной цели сформулированы и решены следующие задачи:

1. Выявить базовые закономерности накопления и трансформации свойств поверхностного слоя на стадиях жизненного цикла изделия и обосновать роль программ нагружения в качестве ключевого механизма технологического наследования.
2. Разработать структурно-аналитическую модель формирования качества поверхностного слоя под воздействием программ нагружения в зависимости от режимов обработки.
3. Разработать аналитические модели формирования и трансформации программ нагружения и качества поверхностного слоя в зависимости от режимов обработки и параметров очагов деформации.
4. Разработать методику и выполнить экспериментальные исследования влияния технологических факторов и программ нагружения на формирование и трансформацию качества поверхностного слоя в процессах резания и ППД.
5. Разработать методику проектирования упрочняющих технологических процессов ППД с учетом технологического наследования, осуществить ее апробацию и внедрение в промышленность.

Научная новизна

1. Разработана структурная модель обеспечения качества поверхностного слоя в процессах резания и ППД, описывающая наследственные закономерности накопления деформации и исчерпания запаса пластичности металла поверхностного слоя в очаге деформации, формирующемся под воздействием режимов обработки.
2. Разработаны аналитические модели формирования и трансформации программ нагружения в процессах резания и ППД статическими методами, отражающие физический характер явлений, происходящих в поверхностном слое, в зависимости от режимов обработки и параметров очагов деформации.
3. Установлен и научно обоснован характер формирования качества поверхностного слоя под влиянием режимов обработки на основе наследственных закономерностей накопления деформации поверхностным слоем детали при резании и ППД обкаткой роликами, шариками, алмазным выглаживанием.

Практическая значимость и реализация результатов работы

1. Разработаны и апробированы методики исследований влияния режимов обработки и параметров очагов деформации на формирование и трансформацию программ нагружения в процессах резания и ППД.

2. Разработаны технологические рекомендации по выбору режимов резания и ППД, обеспечивающих заданное качество поверхностного слоя, на основе реализации требуемых программ нагружения.
3. Разработаны алгоритм и программная система, автоматизирующая расчет программ нагружения, накопленной деформации и степени исчерпания запаса пластичности, параметров качества поверхностного слоя и долговечности изделий.

Результаты научных исследований апробированы и приняты к внедрению в виде технологических процессов, методик и компьютерной программы с суммарным ожидаемым годовым экономическим эффектом около 464 000 руб. в условиях ОАО «Юрмаш», ОАО «Кузбасская вагоностроительная компания».

Представленные в диссертационной работе исследования выполнялись в рамках научно-технической программы Минобразования РФ «Научные исследования высшей школы по приоритетным направлениям науки и техники», подпрограмма 205 – «Транспорт», раздел – 205.03 «Наземные транспортные средства» в период с 2000 по 2003 г.г., ФЦП «Научные и научно-педагогические кадры России на 2009-2013 годы», проект № 02.740.11.0033.

Личный вклад автора заключается в постановке задач, проведении теоретических и экспериментальных исследований, разработке методического и аппаратного обеспечения исследований, обобщении полученных результатов, сопоставлении полученных результатов с литературными данными и формулировании выводов.

Достоверность результатов

Результаты работы получены на основе базовых положения технологии машиностроения и теории механической обработки, методов общенаучной методологии, в том числе структурного моделирования и синтеза, статистического и компьютерного моделирования, механики деформируемых сред, метода конечных элементов и других, что в целом обеспечило корректность постановки и решения задач, а также адекватность полученных математических и статистических моделей. Сформулированные научные положения, результаты работы, выводы и рекомендации обоснованы теоретическими решениями и экспериментальными данными, не противоречат известным положениям технических и фундаментальных наук и основаны на строго доказанных выводах, предложенных авторами предыдущих исследований. Выявленные в результате экспериментально-аналитических исследований зависимости объясняют более 85% всей дисперсии экспериментальных данных, относительная погрешность определения не превышает 10%.

На защиту выносятся:

- аналитические модели формирования качества поверхностного слоя с учетом технологического наследования;
- результаты экспериментальных исследований формирования качества поверхностного слоя под воздействием программ нагружения;
- методика проектирования упрочняющих технологических процессов ППД с учетом технологического наследования

Апробация работы. Основные положения диссертационной работы и её результаты докладывались и обсуждались на:

- всероссийской конференции молодых ученых «Материаловедение, технология и экология на рубеже веков», Томск, 2000 г.;
- 39-й международной научно-технической конференции ААИ «Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и подготовки инженерных и научных кадров», Москва, 2002 г.
- 2-й областной научной конференции «Молодые ученые Кузбассу», Кемерово, 2003 г.;
- всероссийской научно-практической конференции «Прогрессивные технологии и экономика в машиностроении», Юрга, 2003 г;
- всероссийской научно-практической конференции «Современные проблемы в технологии машиностроения», Новосибирск, 2009 г;
- международной научно-практической конференции «Инженерия поверхностного слоя деталей машин», Кемерово, 2009 г.

Публикации. Основное содержание диссертации отражено в 12 научных работах автора, из которых 3 работы опубликовано в журналах, входящих в перечень изданий, рекомендованных ВАК РФ, 2 – в научных журналах, 6 – в сборниках трудов международных и Всероссийских научно-технических конференций, 1 программа для ЭВМ.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, 5 глав, основных результатов и выводов, списка использованных источников из 101 наименования и приложения. Работа содержит 235 страниц основного текста, в том числе 112 рисунков и 32 таблицы.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность темы диссертационной работы, кратко определен объект исследований, изложены суть поставленной научной задачи, цель и задачи исследования, приведены основные результаты работы .

В первой главе проведен анализ работ, посвященных формированию свойств поверхностного слоя в процессах упрочняющей механической обработки ППД и проектированию технологических процессов, обеспечивающих требуемое качество и эксплуатационные характеристики.

Различные подходы к проектированию, учету и анализу явления технологического наследования нашли отражения в работах В.И. Аверченкова, П.Г. Алексеева, А.П. Бабичева, Б.М. Базрова, В.Ф. Безъязычного, В.Ю. Блюменштейна, А.С. Васильева, Н.Н. Давиденкова, А.М. Дальского, М.Л. Елизаветина, А.И. Исаева, А.В. Киричека, В.М. Кована, А.И. Кондакова, И.В. Кудрявцева, А.А. Маталина, А.Н. Овсеенко, А.В. Подзея, Э.В. Рыжова, В.М. Смелянского, А.П. Соколовского, А.М. Сулимы, А.Г. Суслова, А.В. Тотая, Д.Л. Юдина, П.И. Ящерицына и других.

Однако в данных работах недостаточно полно описаны физический характер явления технологического наследования как процесса непрерывного нако п-

ления и трансформации свойств поверхностного слоя на стадиях обработки и эксплуатации.

Анализ показал, что описание сложных явлений, происходящих в поверхностном слое при обработке и эксплуатации, возможно на основе научных положений механики технологического наследования, разработанных В.Ю. Блюменштейном. В основе механики ТН лежит представление о том, что формирование состояния поверхностного слоя происходит в результате накопления им деформации и исчерпания запаса пластичности на всех стадиях жизненного цикла изделия.

Установлено геометрическое и механическое подобие в формировании программ нагружения на стадиях резания и ППД, заключающееся в том, что ПН имеет три участка квазимонотонной деформации. На первом участке накопление деформации происходит в условиях уменьшения показателя напряженного состояния, на втором участке деформация накапливается при увеличении показателя и смещении его в положительную область, на третьем участке накапливается весьма незначительная деформация.

Технологическое наследование проявляется в трансформации программ нагружения, которая выражается в уменьшении накопления деформации и диапазона изменения показателя напряженного состояния на каждой последующей стадии.

Анализ показал, что описание ПН возможно на основе параметров очагов деформации, в зависимости от которых рассчитываются значения накопленной степени деформации сдвига в определенных ключевых точках.

Однако представления о программах нагружения требуют развития с позиций влияния режимов обработки на формирование ПН на стадиях резания и ППД, количественной оценки трансформации программ нагружения, формирования параметров качества поверхностного слоя.

Во второй главе приведены результаты аналитических исследований, полученные на основе разработанной структурной модели обеспечения качества поверхностного слоя под воздействием ПН (рис. 1).

Под воздействием режимов на данной стадии нагружения в ПС металла возникает наследственный очаг деформации, геометрические параметры которого связаны с технологическими режимами и историей нагружения зависимостями вида:

$$\boldsymbol{ПОД}_{рез} = \boldsymbol{f}\left(\boldsymbol{t, S(V), R_{пр}}, \alpha, \gamma, \Lambda_{i-1}\right), \quad \boldsymbol{ПОД}_{ППД} = \boldsymbol{f}\left(\boldsymbol{P, S, R_{пр}}, \Lambda_{i-1}\right), \qquad (1)$$

где $\boldsymbol{ПОД}_{рез}$ – параметр очага деформации, возникающий при резании; $\boldsymbol{ПОД}_{ППД}$ – параметр очага деформации, возникающий при ППД; $\boldsymbol{t}$ – глубина резания; $\boldsymbol{S}$ – подача; $\boldsymbol{V}$ – скорость резания; γ и α – передний и задний углы соответственно; $\boldsymbol{P}$ – усилие, при котором осуществляется ППД; $\boldsymbol{R_{пр}}$ – профильный радиус инструмента; Λ_{i-1} – степень деформации сдвига, накопленной на предшествующих стадиях обработки.

В очаге деформации формируется программа нагружения, представленная в виде зависимостей от параметров ОД и истории нагружения:

$$\Lambda_n = f(ПОД, \Lambda_{i-1});\ П_n = f(ПОД, \Lambda_{i-1});\ \Lambda(П) \equiv \Lambda_n = f(П_n) \qquad (2)$$

где Λ_j и $П_j$ – точки программы нагружения материальной частицы при ее прохождении по линии тока в очаге деформации, $\Lambda(П)$ – программа нагружения.

Воздействие ПН (через режимы) на поверхностный слой приводит к накоплению пластической деформации и исчерпанию запаса пластичности:

$$\Lambda_i = f(\Lambda(П)),\ \Psi_i = f(\Lambda(П)). \qquad (3)$$

Это, в свою очередь, формирует новое состояние поверхностного слоя .

В рамках разработанной аналитической модели выполнялся расчет степени деформации сдвига и показателя напряженного состояния в ключевых точках ПН через параметры ОД без учета и с учетом истории нагружения, далее осуществлялось аналитическое описание участков ПН с определением коэффициентов аппроксимации.

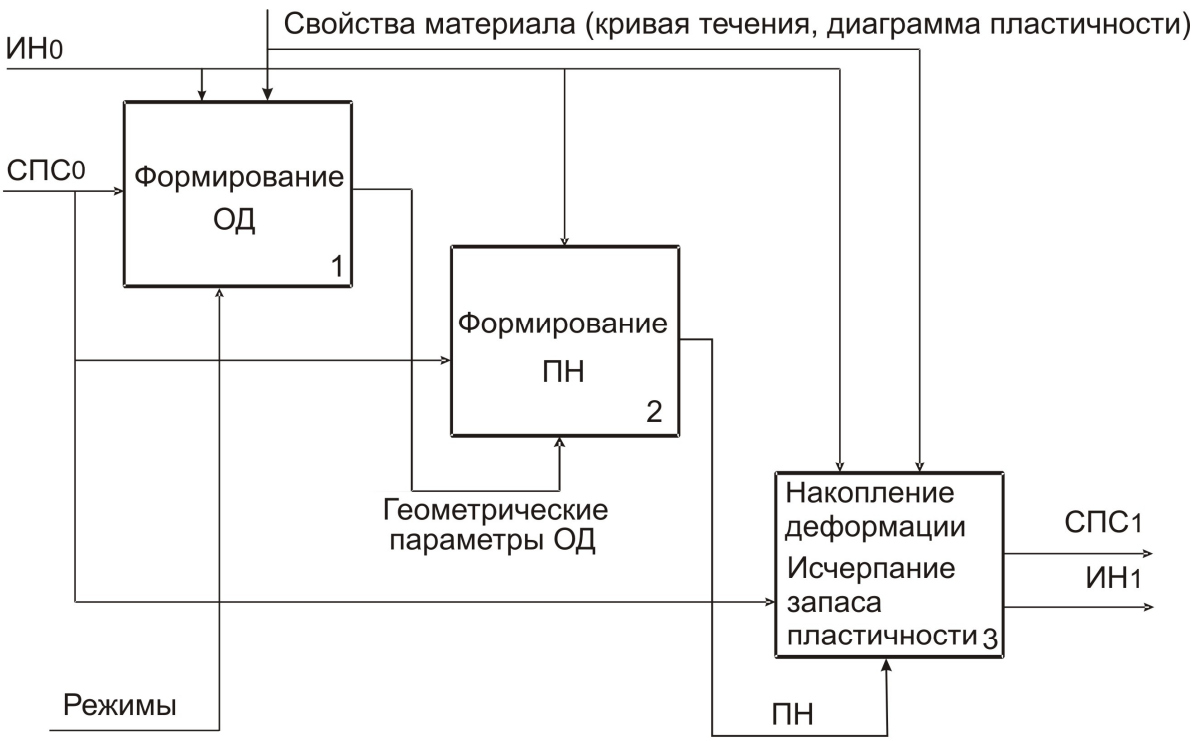

Рис. 1. Структурная модель обеспечения качества поверхностного слоя под воздействием ПН

Расчет Λ в ключевых точках ПН на стадии ППД осуществлялся на основе базовой модели В.М. Смелянского по суммарному углу наклона касательной к профилю ОД на контактной и внеконтактной поверхностях:

$$\Lambda_j = 2k \sum_{j=1}^{j=3} arctg \left\{ \left[-\frac{2\left(\pm \left(x_{|B,C',E} \right)_j - c_j \right)}{g_j} \right] \times \right.$$
$$\left. \times \left[b_j \exp\left(-\frac{(\pm\left(x_{|B,C,E} \right)_j - c_j)^2}{g_j} \right) \right] \right\}, \qquad (4)$$

где j – номер участка квазимонотонной деформации; k – коэффициент кривизны профиля очага деформации и условий на контакте деформирующего инструмента с деталью; b_j, c_j и g_j – коэффициенты на соответствующем участке квазимонотонной деформации, зависящие от геометрических параметров ОД; x_B, $x_{C'}$ и x_E – абсциссы точек перегиба соответствующего участка профиля очага деформации (рис. 2).

Обработкой экспериментальных данных получена зависимость показателя напряженного состояния $П$ в конце первого участка квазимонотонной деформации:

$$П_1 = a_П (w)^{b_П}, \qquad (5)$$

где w – показатель, характеризующий мощность ОД ($w = dh_в$, d - горизонтальная проекция передней дуги контакта, $h_в$ - высота волны); $a_П$ и $b_П$ - коэффициенты

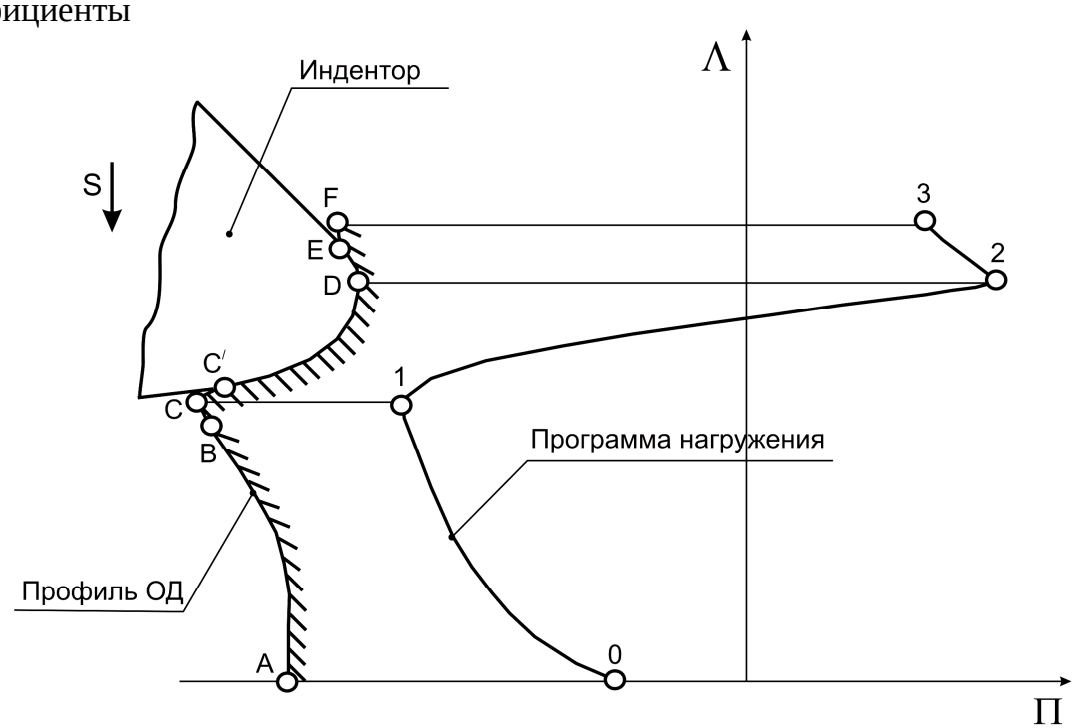

Рис. 2. Профиль ОД при ППД и соответствующая программа нагружения

На стадии резания с учетом подобия процессов расчет Λ и $\boldsymbol{\Pi}$ проводился аналогично, при этом предложены функции подобия $\boldsymbol{k_{ij}^{\Lambda рез}}$ и $\boldsymbol{k_{ij}^{През}}$, в качестве аргументов которых выступали геометрические параметры ОД.

Установлено, что влияние технологической наследственности выражается в трансформации программ нагружения.

Показано, что на каждой последующей стадии накапливается меньшее значение деформации в условиях менее значительного изменения показателя напряженного состояния, то есть происходит «сжатие» ПН по осям координат.

Расчет Λ и $\boldsymbol{\Pi}$ в ключевых точках ПН с учетом истории нагружения проводился на основе интегрального уравнения второго рода:

$$\Lambda_{ij}^{ИН} = \Lambda_0 + \Lambda_{ij} \sum_n \boldsymbol{K}(\boldsymbol{N}-\boldsymbol{n})\Lambda_n \Delta\Pi_n , \tag{6}$$

$$\Pi_{ij}^{ИН} = \varphi(\Lambda_{ij}) - \Pi_{ij} \sum_n \boldsymbol{R}(\boldsymbol{N}-\boldsymbol{n})\varphi(\Lambda_n)\Delta\Pi_n , \tag{7}$$

где $\Lambda_{ij}^{ИН}$ и $\Pi_{ij}^{ИН}$ – соответственно степень деформации сдвига и показатель напряженного состояния на $\boldsymbol{j}$-ом этапе $\boldsymbol{i}$-ой стадии нагружения с учетом истории нагружения; Λ_0 – степень деформации сдвига в момент начала $\boldsymbol{i}$-ой стадии нагружения; Λ_{ij} и Π_{ij} – соответственно степень деформации сдвига и показатель напряженного состояния на $\boldsymbol{j}$-ом этапе $\boldsymbol{i}$-ой стадии нагружения без учета истории нагружения; $\boldsymbol{K}(\boldsymbol{N}-\boldsymbol{n})$ - ядро; $\boldsymbol{R}(\boldsymbol{N}-\boldsymbol{n})$ - резольвента ядра; Λ_n – степень деформации сдвига, накопленная к концу $\boldsymbol{n}$-го этапа нагружения; $\Delta\Pi_n$ – изменение показателя напряженного состояния на $\boldsymbol{n}$-ом этапе нагружения; $\varphi(\Lambda)$ - функция влияния предшествующей деформации на формирование НДС.

В ходе исследований установлено, что форма ПН существенно влияет на численные значения накапливаемых свойств поверхностного слоя. Анализ показал, что участки ПН могут быть аппроксимированы экспоненциальными функциями:

$$\begin{aligned} &\Lambda = \boldsymbol{a_{ij}^{ПН}}\, \boldsymbol{exp}\left(\boldsymbol{b_{ij}^{ПН}}\,\boldsymbol{\Pi}\right) + \boldsymbol{c_{ij}^{ПН}} \quad \text{– 1-й участок программы нагружения;} \\ &\Lambda = \boldsymbol{a_{ij}^{ПН}}\, \boldsymbol{exp}\left(\boldsymbol{b_{ij}^{ПН}}\,\boldsymbol{\Pi}^2\right) + \boldsymbol{c_{ij}^{ПН}} \quad \text{– 2-й участок программы нагружения.} \end{aligned} \tag{8}$$

где $\boldsymbol{a_{ij}^{ПН}}$, $\boldsymbol{b_{ij}^{ПН}}$ и $\boldsymbol{c_{ij}^{ПН}}$ – коэффициенты аппроксимации.

Исследования показали, что третий участок может быть описан прямой линией.

Коэффициенты $\boldsymbol{a_{ij}^{ПН}}$ и $\boldsymbol{b_{ij}^{ПН}}$ рассчитывались по значению Λ и $\boldsymbol{\Pi}$ в ключевых точках ПН. Коэффициент $\boldsymbol{c_{ij}^{ПН}}$ определялся по зависимости:

$$\boldsymbol{c_{ij}^{ПН}} = \boldsymbol{a}_{\boldsymbol{c_{ij}^{ПН}}}(\boldsymbol{w})^{\boldsymbol{b}_{\boldsymbol{c_{ij}^{ПН}}}} , \tag{9}$$

где $a_{c_{ij}^{ПН}}$ и $b_{c_{ij}^{ПН}}$ - коэффициенты.

Коэффициенты в моделях (5), (8)-(9) определялись в ходе экспериментальных исследований процессов резания и ППД по специально разработанной методике в наследственной постановке.

В третьей главе представлена методика экспериментальных исследований формирования и трансформации качества поверхностного слоя под воздействием программ нагружения на стадиях резания и ППД. Материалами для проведения исследований являлись стали 45, 12ХН3А, 30ХГСА, а также алюминиевый сплав АК6.

Экспериментальные исследования формирования программ нагружения по схеме свободного ортогонального резания осуществлялись на горизонтально-фрезерном станке. Подача S варьировалась от 0,025 м/мин до 0,1 м/мин, толщина срезаемого слоя a – от 0,1 мм до 1 мм, радиус округления режущей кромки ρ – от 0,15 мм до 2 мм, передний угол γ – от -10° до 35°. Геометрия инструмента обеспечивалась обработкой стандартных пластин из твердого сплава ВК8 на оптико-шлифовальном станке и державками, изготовленными из стали 40Х.

Расчет программ нагружения осуществлялся методом делительных сеток (МДС), нанесенных на боковую поверхность образца, по геометрическим параметрам очагов деформации, а также с помощью метода конечных элементов (МКЭ).

Исследование формирования программ нагружения в зависимости от режимов и параметров ОД осуществлялось на основе метода визиопластичности. Оптическая система состояла из двух линз, закрепленных в специальных оправках и снабженных микрометрическими винтами для тонкой регулировки и настройки, и видеокамеры для скоростной видеосъемки. Для реализации условия плоской деформации перед образцом устанавливалось прозрачное закаленное стекло. Юстировка оптической системы осуществлялась с помощью гелий-неонового лазера.

Линии тока в очаге деформации определялись по искаженной делительной сетке на боковой поверхности образца. После обработки и выделения отдельных кадров вдоль линий тока рассчитывались параметры НДС, программы нагружения и степень исчерпания запаса пластичности.

Экспериментальные исследования формирования и трансформации программ нагружения и качества поверхностного слоя на стадии ППД осуществлялись путем обкатывания гладких цилиндрических образцов диаметром 30-120 мм, длиной 300 мм из стали 45.

Многоходовое обкатывание до появления следов разрушения производилось на токарно-винторезном станке с помощью специального однороликового приспособления, имеющего возможность быстрой смены деформирующих роликов диаметром 64 и 95 мм, изготовленных из стали ШХ15. Обкатывание на втором и последующих рабочих ходах осуществлялось по уже обработанной поверхности, имеющей, таким образом, свою историю нагружения.

Усилие обкатывания P варьировалось от 100 до 2500 Н, профильный радиус ролика $R_{пр}$ – от 2,5 до 13,5 мм, подача составляла 0,07 мм/об, частота вращения шпинделя – 630 об/мин.

Далее осуществлялось профилографирование очагов деформации на профилографе-профилометре «Talysurf-5M» фирмы «Rank Taylor Hobson», проводился расчет геометрических параметров ОД, компонент НДС и программ нагружения на каждом рабочем ходе. Идентификация следов разрушения, соответствовавшая полному исчерпанию запаса пластичности, производилась с помощью сканирующей электронной микроскопии.

По полученным профилограммам определялись параметры шероховатости поверхности. Параметры упрочнения поверхностного слоя определялись методом косого среза, измерение микротвердости производилось с помощью микротвердомера ПМТ-3.

В четвертой главе приведены результаты экспериментальных исследований формирования и трансформации программ нагружения на стадиях резания и ППД и качества поверхностного слоя.

Расчет накопленной степени деформации сдвига и показателя напряженного состояния в ключевых точках ПН осуществлялся на основе геометрических параметров ОД, полученных в ходе экспериментальных исследований, и моделированием методом конечных элементов, что позволило сопоставить результаты аналитических и экспериментальных исследований.

В ходе исследований была получена зависимость показателя напряженного состояния от мощности w очага деформации:

$$\Pi_1 = -5{,}336(w)^{0{,}152}. \qquad (10)$$

Расчет программ нагружения в ключевых точках на стадии резания производился по аналогии со стадией ППД с использованием функций подобия. На рис. 3 показана деформированная делительная сетка для образца №16 из стали 45, обработанного по режимам: скорость резания 0,1 м/мин, профильный радиус 0,15 мм, передний угол 35°, толщина срезаемого слоя 0,3 мм. На рис. 4 представлены значения интегральных показателей деформированного состояния образца №16, рассчитанные МКЭ и с помощью метода делительных сеток (МДС).

Анализ полученных результатов показал хорошее соответствие результатов, полученных по параметрам ОД, методами делительных сеток и конечных элементов. Максимальная погрешность значений не превышает 15%.

В ходе исследований установлено, что история нагружения оказывает существенное влияние на формирование программ нагружения (рис. 5-6). Для образца №51 из стали 45, обработанного по режимам: профильный радиус ролика 2,5 мм, усилие обкатывания 2500 Н, подача 0,07 мм/об, который характеризуется интенсивным пластическим течением, значения Λ с учетом и без учета ИН отличаются незначительно. Значения Π без учета ИН ниже, чем с учетом ИН, при этом разница для последующих рабочих ходов увеличивается.

Для образца №56 из стали 45, обработанного по режимам: профильный радиус ролика 5 мм, усилие обкатывания 1500 Н, подача 0,07 мм/об, пластическое течение в котором менее интенсивное, закономерности обратные. Знач е-

ния Λ, рассчитанные без учета ИН, значительно больше, чем с учетом ИН. Значения Π без учета ИН больше, чем с учетом ИН. Для проверки адекватности принятых моделей (6) и (7) расчета накопленной деформации и показателя напряженного состояния в ключевых точках ПН с помощью интегрального уравнения второго рода были определены коэффициенты ядра и резольвенты ядра методом двухпараметрической оптимизации (рис. 7-8).

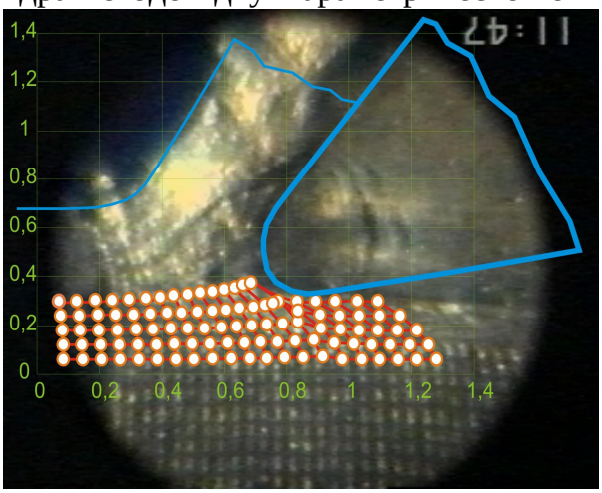

Рис. 3. Деформированная делительная сетка для образца №16

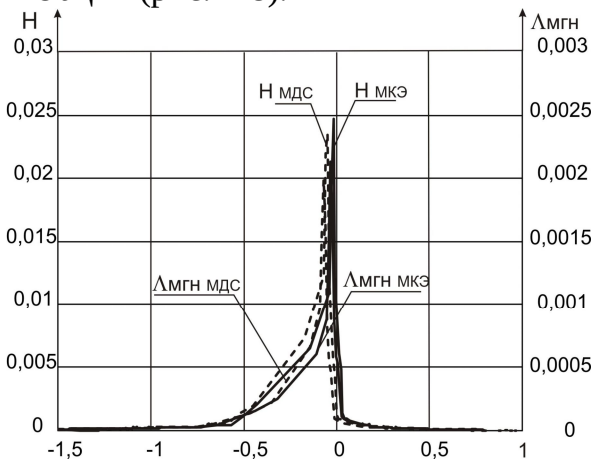

Рис. 4. Мгновенные значения интенсивности скоростей деформации и степени деформации для образца №16

В ходе исследований выявлено, что технологическое наследование оказывает существенное влияние на форму программ нагружения, которое выражается в «сжатии» программ нагружения по осям, то есть в уменьшении накапливаемой деформации и абсолютных значений показателя напряженного состояния на каждой последующей стадии нагружения, а также в изменении формы участков квазимонотонной деформации.

Экспериментальные и аналитические программы нагружения на стадиях резания и ППД, полученные методами делительных сеток и конечных элементов, и на основе параметров ОД по модели (4), приведены на рис. 9-10.

Установлено, что формирование программ нагружения на стадиях резания и ППД подчиняется общим закономерностям. Накопление деформации на первом участке квазимонотонной деформации происходит в условиях «смягчения» схемы напряженного состояния, на втором участке деформация накапливается в условиях перехода показателя напряженного состояния в более «жесткую» область. Особенностью ПН на стадии резания является в целом более «жесткая» схема напряженного состояния, приводящая к разделению потоков металла и образованию стружки, а также более значительное по сравнению с ППД накопление деформации на втором участке. Для экспериментальных программ нагружения характерно более плавное изменение направления знака деформации, что выражается в их сглаженной форме.

Выявлено, что накопленная поверхностным слоем деформация оказывает существенное влияние на параметры качества поверхностного слоя.

В ходе исследований получены модели влияния степени деформации сдвига на степень упрочнения δ (11), параметр шероховатости $\boldsymbol{R_a}$ (12).

$$\delta = 0{,}364\Lambda^2 + 1{,}04 \qquad (11)$$

$$Ra = 1{,}884\Lambda^3 - 2{,}44\Lambda^2 + 0{,}333\Lambda + 0{,}599 \qquad (12)$$

Анализ данных показал, что с увеличением накопленной деформации глубина и степень упрочнения возрастают, зависимость параметра R_a от накопленной деформации носит экстремальный характер.

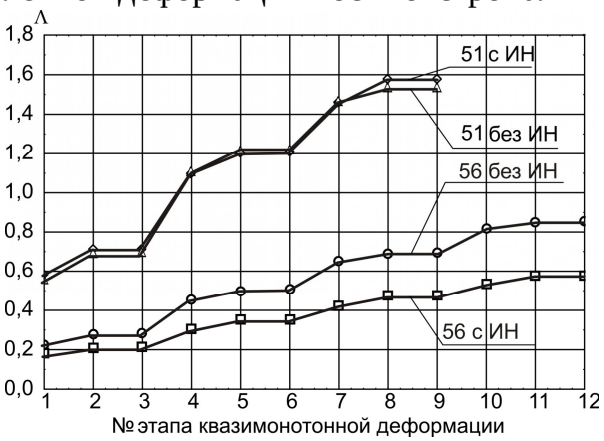

Рис. 5. Степень деформации сдвига в ключевых точках ПН с учетом и без учета истории нагружения для образцов №51, 56

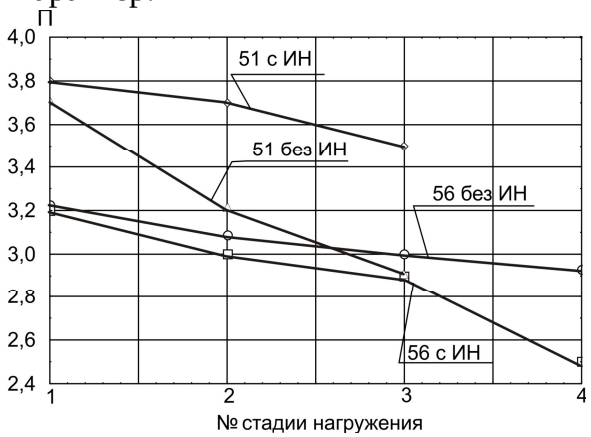

Рис. 6. Показатель напряженного состояния в ключевых точках ПН с учетом и без учета истории нагружения для образцов №51, 56

Результаты экспериментальных исследований подтвердили адекватность разработанных аналитических моделей формирования и трансформации программ нагружения и не противоречат результатам других авторов.

Полученные в ходе экспериментальных исследований зависимости объясняют более 85% всей дисперсии экспериментальных данных, относительная погрешность определения не превышает 10%.

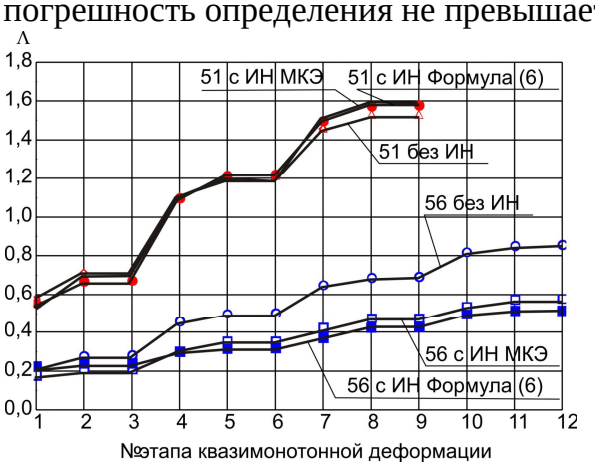

Рис. 7. Степень деформации сдвига в ключевых точках ПН с учетом ИН, рассчитанная с использованием МКЭ и формулы (6) для образцов №51, 56

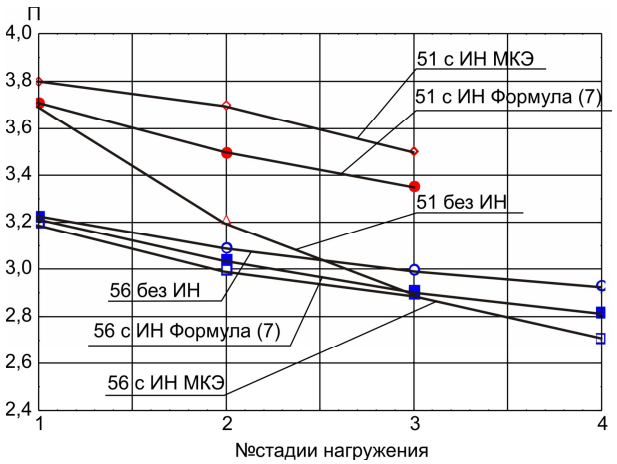

Рис. 8. Показатель напряженного состояния в ключевых точках ПН с учетом ИН, рассчитанный с использованием МКЭ и формулы (7) для образцов № 51, 56

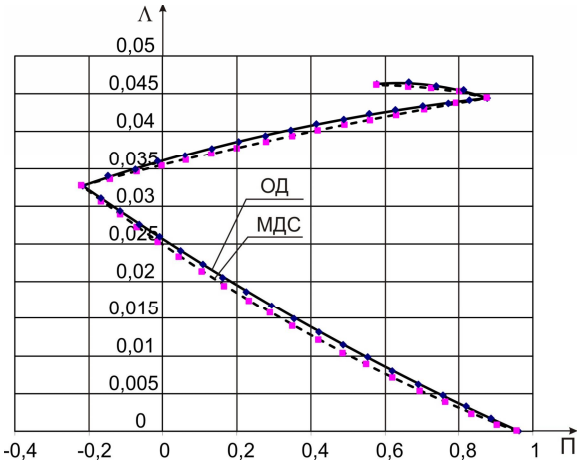

Рис. 9. Экспериментальная (МДС) и аналитическая (ОД) программа нагружения на стадии резания для образца №16

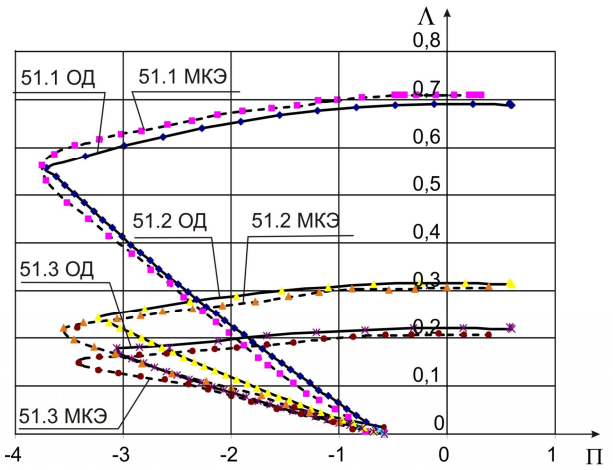

Рис. 10. Экспериментальная (МКЭ) и аналитическая (ОД) программа нагружения на стадии ППД для образца №51

В пятой главе представлены методики, алгоритмы и программная система проектирования упрочняющих технологических процессов, позволяющие контролировать наследуемые параметры качества поверхностного слоя и циклическую долговечность деталей машин на основе формирования заданной программы нагружения.

Разработанные аналитические зависимости формирования и трансформации программ нагружения положены в основу структурно-аналитической модели проектирования упрочняющих технологических процессов, обеспечивающих заданное качество поверхностного слоя.

На базе структурно-аналитической модели разработан алгоритм проектирования упрочняющих технологических процессов ППД, в соответствии с которым на первом этапе по режимам обработки определяются геометрические параметры очагов деформации, далее производится расчет накопленной степени деформации сдвига и показателя напряженного состояния в ключевых точках программы нагружения и производится корректировка с учетом истории нагружения. Затем выполняется аппроксимация участков ПН, рассчитывается накопленная деформация Λ, степень исчерпания запаса пластичности Ψ, параметры качества поверхностного слоя и циклическая долговечность.

Этапы разработанного алгоритма реализованы в виде программной системы, прошедшей официальную регистрацию и включенной в реестр программ для ЭВМ Российского агентства по патентам и товарным знакам. Программная система «Программа нагружения поверхностного слоя деталей машин» позволила автоматизировать расчет программ нагружения на стадиях резания и ППД, исчерпания запаса пластичности, параметров качества поверхностного слоя и циклической долговечности на основе заданного маршрута обработки и режимов.

Результаты научных исследований апробированы и приняты к внедрению на машиностроительных предприятиях в виде методик, программной системы

расчета и технологических процессов с суммарным ожидаемым годовым экономическим эффектом 464 350 рублей.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

1. Выявлены базовые закономерности формирования поверхностного слоя на основе накопления им пластической деформации и научно обоснована роль программ нагружения, отражающих физический характер технологического наследования и позволяющих обеспечить заданное качество и долговечность упрочняемых деталей машин.
2. Разработана структурная модель обеспечения качества поверхностного слоя в процессах резания и ППД, в основу которой положены закономерности накопления деформации и исчерпания запаса пластичности металла в наследственных очагах деформации под воздействием технологических режимов обработки.
3. Разработаны аналитические модели формирования качества поверхностного слоя, учитывающие сложный немонотонный характер накопления деформации и позволяющие выполнять расчеты параметров качества с учетом технологического наследования.
4. Выполнены экспериментальные исследования и установлены зависимости параметров наследственных очагов деформации от режимов обработки, с одной стороны, и качества поверхностного слоя от программ нагружения с другой. Выявлено, что с учетом технологического наследования при значении степени деформации сдвига на всех рассматриваемых операциях обработки $\Lambda = \boldsymbol{0,6}$ глубина упрочнения составляет $\boldsymbol{h = 1,35 - 1,4}$ мм, степень упрочнения $\delta = \boldsymbol{1,15 - 1,2}$. При обработке ППД на режимах, обеспечивающих интенсивное пластическое течение металла, минимальное значение шероховатости $\boldsymbol{Ra0,3}$ мкм достигается при степени деформации $\Lambda = \boldsymbol{0,8}$; на режимах, обеспечивающих незначительное пластическое течение, минимум шероховатости $\boldsymbol{Ra0,6}$ мкм соответствует степени деформации $\Lambda = \boldsymbol{0,4}$.
5. Разработана методика проектирования процессов упрочняющей механической обработки ППД с учетом наследования свойств поверхностного слоя, позволяющая формировать рациональную структуру технологического процесса, и даны рекомендации по назначению режимов обработки, обеспечивающих требуемые программы нагружения с позиций заданного качества и долговечности.
6. Результаты диссертационной работы апробированы и внедрены на машиностроительных предприятиях в виде методик, алгоритмов и программной системы, зарегистрированной в реестре программ для ЭВМ Российского агентства по патентам и товарным знакам, что позволило снизить материалоемкость при обеспечении требуемой долговечности деталей машин. Суммарный ожидаемый годовой экономический эффект составляет 464 350 рублей.

Основные положения диссертации опубликованы в работах
В изданиях, рекомендуемых ВАК РФ:

1. Блюменштейн В. Ю. Аналитическое описание программ нагружения на стадиях механической обработки [Текст] / В. Ю. Блюменштейн, К. П. Петренко // Вестник КузГТУ. – 2009. – №6. – С. 77 – 83.
2. Блюменштейн В. Ю. Влияние истории нагружения на трансформацию программ нагружения в процессах механической обработки [Текст] / В. Ю. Блюменштейн, А. А. Кречетов, К. П. Петренко // Упрочняющие технологии и покрытия. – М. : Машиностроение, 2010. – №3. – С. 3 – 8.
3. Петренко К. П. Структурно-аналитическая модель формирования состояния поверхностного слоя на стадиях механической обработки [Текст] / К. П. Петренко // Автомобильная промышленность. – М. : Машиностроение, 2010. – №4. – С. 29 – 31.

Публикации в других изданиях:

4. Блюменштейн В. Ю. Онтология технологической наследственности с позиций программ нагружения очагов деформации на стадиях резания и ППД [Текст] / В. Ю. Блюменштейн, К. П. Петренко // Инструмент Сибири – 2000. – №3. – С. 21 – 24.
5. Петренко К. П. Методика проведения экспериментального исследования технологического наследования [Текст] / К. П. Петренко // Материаловедение, технологии и экология на рубеже веков: сборник трудов Всероссийской конференции молодых ученых. – Томск: ТНЦ СО РАН, 2000. – С. 187 – 189.
6. Петренко К. П. Технологическое наследование в категориях программ нагружения на стадиях резания и ППД [Текст] / К. П. Петренко // Приоритеты развития отечественного автотракторостроения и подготовки инженерных и научных кадров: Сборник трудов 39-й Международной научно-технической конференции ААИ. – Москва, 2002. – С. 25 – 27.
7. Петренко К. П. Формирование механических параметров поверхностного слоя на стадии резания [Текст] / К. П. Петренко // «Молодые ученые Кузбассу»: Сборник трудов 2-й областной научной конференции. – Кемерово, 2003. – С.261 – 262.
8. Петренко К. П. Моделирование программ нагружения на стадии ППД с позиций технологического наследования [Текст] / К. П. Петренко // Прогрессивные технологии и экономика в машиностроении: труды Всероссийской научно-практической конференции. – Юрга, 2003. – С. 144 – 145.
9. Закономерности формирования состояния поверхностного слоя при свободном ортогональном резании [Текст] / А. А. Кречетов, К. П. Петренко – Кузбасс. гос. техн. ун-т. – Кемерово, 2003. – 14 с. – Деп. в ВИНИТИ №81 – В2003.
10. Петренко К. П. Аналитическое описание программ нагружения в процессах упрочняющей механической обработки [Текст] / К. П. Петренко // Современные проблемы технологии машиностроения: сборник трудов Всеро с-

сийской научно-практической конференции. – Новосибирск, 2009. – С. 272 – 275.

11. Петренко К. П. Формирование качества поверхностного слоя под действием программ нагружения в процессах механической обработки [Текст] / К. П. Петренко // Инженерия поверхностного слоя деталей машин: труды Международной научно-практической конференции. – Кемерово, 2009 – С. 328 – 335.
12. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ № 2010612754, Российская Федерация. Программа нагружения поверхностного слоя деталей машин / В. Ю. Блюменштейн, А. А. Кречетов, К. П. Петренко; правообладатель К. П. Петренко. – Заявка № 2010610200; дата поступления 19 января 2010; дата регистрации 22 апреля 2010.

Подписано в печать 29.10.2010. Формат 60×84/16
Бумага офсетная. Отпечатано на ризографе. Уч. изд. л. 1,0.
Тираж 100. Заказ ….

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
«Кузбасский государственный технический университет»
650026, Кемерово, ул. Весенняя, 28
Типография государственного образовательного учреждения
«Кузбасский государственный технический университет»
650099, Кемерово, ул. Д. Бедного, 4 А