ЕЖЕМЕСЯЧНЫЙ НАУЧНО-ТЕХНИЧЕСКИЙ И ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ЖУРНАЛ

# УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ

№ 5 (113)
май
2014

Издается с января 2005 г.

**Главный редактор**
д.т.н., проф.
Ю.В. ПАНФИЛОВ

**Председатель редакционного совета**
д.т.н., проф., заслуженный деятель науки и техники РФ
В.Ф. БЕЗЪЯЗЫЧНЫЙ

**Заместитель главного редактора**
д.ф.-м.н., проф.
В.Ю. ФОМИНСКИЙ

**Заместители председателя редакционного совета:**
д.т.н., проф.
В.Ю. БЛЮМЕНШТЕЙН
д.т.н., проф.
А.В. КИРИЧЕК
д.т.н., проф.
О.В. ЧУДИНА

**Редакционный совет:**
Ю.П. АНКУДИМОВ, к.т.н., доц.
А.П. БАБИЧЕВ, д.т.н., проф.
В.П. БАЛКОВ, к.т.н.
В.М. БАШКОВ, к.т.н., доц.
А.И. БЕЛИКОВ, к.т.н., доц.
А.И. БОЛДЫРЕВ, д.т.н., проф.
С.Н. ГРИГОРЬЕВ, д.т.н., проф.
В.А. ЗЕМСКОВ, к.т.н.
С.А. КЛИМЕНКО, д.т.н., проф.
Ю.Р. КОПЫЛОВ, д.т.н., проф.
В.А. ЛАШКО, д.т.н., проф.
В.А. ЛЕБЕДЕВ, к.т.н., проф.
В.В. ЛЮБИМОВ, д.т.н., проф.
Е.Д. МАКАРЕНКО
Б.Я. МОКРИЦКИЙ, д.т.н., проф.
Ф.И. ПАНТЕЛЕЕНКО, д.т.н., проф.
Х.М. РАХИМЯНОВ, д.т.н., проф.
Б.П. САУШКИН, д.т.н., проф.
В.П. СМОЛЕНЦЕВ, д.т.н., проф.
А.М. СМЫСЛОВ, д.т.н., проф.
Г.А. СУХОЧЕВ, д.т.н., проф.
В.П. ТАБАКОВ, д.т.н., проф.
В.А. ШУЛОВ, д.ф.-м.н., проф.
М.Л. ХЕЙФЕЦ, д.т.н., проф.

**Редакция:**
И.Н. МЫМРИНА
Т.В. ПАРАЙСКАЯ

Журнал распространяется по подписке, которую можно оформить в любом почтовом отделении (индексы по каталогам: "Роспечать" **85159**, "Пресса России" **39269**, "Почта России" **60252**) или в издательстве.
Тел.: (499) 269-52-98, 269-66-00, 268-40-77.
Факс: (499) 269-48-97.
E-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru

Журнал зарегистрирован в Министерстве РФ по делам печати, телерадиовещания и средств массовых коммуникаций. Свидетельство о регистрации ПИ № 77-17733 от 09.03.04 г.

# СОДЕРЖАНИЕ

## ОБЩИЕ ВОПРОСЫ УПРОЧНЕНИЯ

**Елкин М.С.** Исследование влияния наноструктурированных покрытий режущего инструмента на параметры качества обработанной поверхности при фрезеровании концевыми фрезами . . . . . 3

**Любимов Д.Н., Долгополов К.Н., Глазунова Е.А., Мельников Э.Л., Сережкин М.А., Бодарева А.В.** Эффекты самоорганизации в узлах трения при эксплуатации в смазочной среде, содержащей твердые наполнители . . . . . 6

**Гаркунов Д.Н., Бабель В.Г., Мельников Э.Л.** Металлоплакирующие смазочные материалы . . . . . 9

**Сергеев Е.С., Зинин М.А., Щедрин А.В., Поляков А.О., Чихачева Н.Ю., Гаркунов Д.Н., Мельников Э.Л.** Новые направления самоорганизации контактных процессов в методах лезвийной, деформирующей и комбинированной обработки . . . . . 14

## МЕХАНИЧЕСКАЯ УПРОЧНЯЮЩАЯ ОБРАБОТКА

**Кузнецов В.А., Тимофеева Т.Д., Хомякова Н.В.** Повышение эффективности операций механообработки за счет модификации поверхностного слоя инструментов . . . . . 16

**Смирнов А.В.** Влияние способа установки сменной многогранной пластины на силу, контактное давление и цикличность нагружения при обработке выглаживанием . . . . . 19

**Черепахин А.А., Виноградов В.М.** Особенности кинематики процесса холодного накатывания и выбор наиболее рациональной схемы его реализации . . . . . 24

## ПОЛИМЕРНЫЕ И КОМПОЗИЦИОННЫЕ ПОКРЫТИЯ

**Верещака А.А., Верещака А.С., Попов А.Ю.** Разработка и исследование наноструктурированных многослойно-композиционных покрытий твердосплавных инструментов, предназначенных для тяжелых условий обработки . . . . . 28

**Верещака А.С., Верещака А.А., Булычева А.И.** Многослойные нанодисперсные покрытия для режущего инструмента . . . . . 33

## ОБРАБОТКА КОМБИНИРОВАННЫМИ МЕТОДАМИ

**Щедрин А.В., Козлов А.Ю., Сергеев Е.С.** Исследование технологических возможностей комбинированного инструмента для охватывающей обработки с параллельным сочетанием резания и деформирования . . . . . 40

## ИНФОРМАЦИЯ. ПРОИЗВОДСТВЕННЫЙ ОПЫТ

**Исаев Д.А., Исаева Е.А., Крутина Е.В.** Анализ изготовления дисков газотурбинного двигателя . . . . . 45

**Перепечатка, все виды копирования и воспроизведения материалов, публикуемых в журнале "Упрочняющие технологии и покрытия", допускаются со ссылкой на источник информации и только с разрешения редакции**

**Журнал входит в Перечень утвержденных ВАК РФ изданий для публикации трудов соискателей ученых степеней**

© **Издательство "Машиностроение", "Упрочняющие технологии и покрытия", 2014**

THE MONTHLY SCIENTIFIC AND PRODUCTION JOURNAL

# STRENGTHENING TECHNOLOGIES AND COATINGS

№ 5 (113)
May
2014

Since 2005, January

**Editor-in-Chief**
Dr of Eng. Sci.
Yu.V. PANFILOV

**Chair of Editorial Council**
Dr of Eng. Sci., The honoured worker of a science and technics of the RF
V.F. BEZYAZYCHNYI

**Editorial Assistant**
Dr of Phys. Math. Sci.
V.Yu. FOMINSKY

**Chairman Assistants:**
Dr of Eng. Sci.
V.Yu. BLUMENSTEIN
Dr of Eng. Sci.
A.V. KIRICHEK
Dr of Eng. Sci.
O.V. CHUDINA

**Editorial council:**
Yu.P. ANKUDIMOV
A.P. BABICHEV
V.P. BALKOV
V.M. BASHKOV
A.I. BELIKOV
A.I. BOLDYREV
S.N. GRIGORIEV
V.A. ZEMSKOV
S.A. KLIMENKO
Yu.R. KOPYLOV
V.A. LASHKO
V.A. LEBEDEV
V.V. LYUBIMOV
E.D. MAKARENKO
B.Ya. MOKRITSKY
F.I. PANTELEENKO
H.M. RAHIMYANOV
B.P. SAUSHKIN
V.P. SMOLENTSEV
A.M. SMYSLOV
V.A. SHULOV
G.A. SUHOCHEV
V.P. TABAKOV
M.L. KHEIFETS

**Edition:**
I.N. MYMRINA
T.V. PARAYSKAYA

Journal is spreaded on a subscription, which can be issued in any post office (index on the catalogues: "Rospechat" **85159**, "Pressa Rossii" **39269**, "Pochta Rossii" **60252**) or in publishing office.
Ph.: (499) 269-52-98, 269-66-00, 268-40-77. Fax: (499) 269-48-97
E-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru

Journal is registered by RF Ministry Tele- and Broadcasting of Mass Communications Media. The certificate of registration ПИ № 77-17733, March 9, 2004

# CONTENTS

## GENERAL QUESTIONS OF STRENGTHENING

**Elkin M.S.** Influence research nanostructured coverings of the cutting tool on parametres of quality of the processed surface at milling by trailer mills . . . . . 3

**Lyubimov D.N., Dolgopolov K.N., Glazunova E.A., Melnikov E.L., Serezhkin M.A., Bodareva A.V.** Effects of self-organization in friction units in operation in the lubrication medium containing solid fillers . . . . . 6

**Garkunov D.N., Babel V.G., Melnikov E.L.** Anti-friction lubricants . . . . . 9

**Sergeev E.S., Zinin M.A., Shedrin A.V., Polyakov A.O., Chikhacheva N.Yu., Garkunov D.N., Melnikov E.L.** New directions of self-organizing of contact processes in machining job methods . . . . . 14

## MECHANICAL STRENGTHENING PROCESSING

**Kuznetsov V.A., Timofeeva T.D., Khomyakova N.V.** Improving the efficiency of operations of machining due to modification of the surface layer tools . . . . . 16

**Smirnov A.V.** The impact of ways to install an interchangeable multi-faceted plate on the force, contact pressure and cyclical loading during processing of burnishing . . . . . 19

**Cherepahin A.A., Vinogradov V.M.** Features of kinematics of process of a cold calibration and a choice of the most rational circuit of its realisation . . . . . 24

## POLYMER AND COMPOSITE COATINGS

**Vereschaka A.A., Vereschaka A.S., Popov A.Yu.** Development and research of nanostructured multilayer composite coatings carbide tools designed for heavy duty machining . . . . . 28

**Vereschaka A.S., Vereschaka A.A., Bulichova A.I.** Multilayer nano-dispersion coatings for cutting tools . . . . . 33

## PROCESSING BY COMBINED METHODS

**Shedrin A.V., Kozlov A.Yu., Sergeev E.S.** The study of technological capabilities of the combined instrument for covering processing with parallel combination of cutting and deformation . . . . . 40

## INFORMATION. PRODUCTION EXPERIENCE

**Isaev D.A., Isaeva E.A., Krutina E.V.** Analysis of manufacturing GTE disks . . . . . 45

**Reprint is possible only with the reference to the journal "Strengthening technologies and coatings"**

**Journal is included in the List of the Highest Attestation Committee of Russian Federation (VAK RF) for publication of basic results of doctoral theses**

© **"Mashinostroenie Publishers", "Strengthening Technologies and Coatings", 2014**

УДК 67.017

**М.С. Елкин** *(РГАТУ им. П.А. Соловьёва, г. Рыбинск)*
*E-mail: elkin.m89@gmail.com*

# Исследование влияния наноструктурированных покрытий режущего инструмента на параметры качества обработанной поверхности при фрезеровании концевыми фрезами

*Рассмотрено современное состояние знаний о процессе фрезерования концевыми фрезами с наноструктурированными покрытиями. Показано, что в настоящее время отсутствуют фундаментальные работы, направленные на учет влияния наноструктурированных покрытий режущего инструмента на параметры качества поверхностного слоя деталей после фрезерования концевыми фрезами. Обоснована необходимость проведения исследований, выбраны среди известных ранее пути и фундаментальные зависимости для дальнейших исследований.*

***Ключевые слова:*** *фрезерование, упрочнение, наноструктурированные покрытия.*

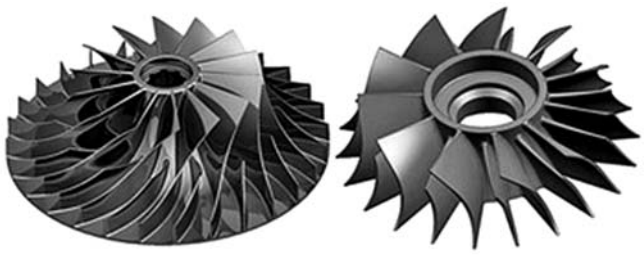
*In article the current state of knowledge of milling process by trailer mills with nanostructured coverings is considered. Absence of fundamental works directed on the influence account nanostructured coverings of the cutting tool on parametres of quality of a blanket of details after milling by trailer mills is shown. Necessity of carrying out of researches is proved, ways and fundamental dependences known earlier for the further researches are chosen.*

***Keywords:*** *milling, hardening, nanostructured coverings.*

Современная техника характеризуется сложностью конструкций и их составляющих деталей. Возрастают эксплуатационные показатели новых машин, такие как мощность, КПД, соответственно возрастает удельная нагрузка на узлы и отдельные, особо ответственные, детали. Это вынуждает использовать материалы, обладающие повышенной прочностью и, как следствие, пониженной обрабатываемостью резанием. Одновременно рынок диктует свои условия, заставляя производителя снижать себестоимость изготовления продукции для увеличения ее конкурентоспособности. Все эти факторы находятся в жесткой связи между собой, что вызывает трудности при стремлении одновременно улучшить все параметры.

По экономическим и техническим показателям механическая обработка со снятием слоя материала – припуска будет оставаться одним из главных формообразующих методов получения деталей в обозримом будущем. С появлением высокоточных фрезерных станков с числовым программным управлением значительно расширились применяемость и границы такого метода обработки, как фрезерование. Фрезерованием можно получить практически любую поверхность, что открыло широкие возможности для автоматизации серийного и единичного производства. На рисунке представлены детали газотурбинных двигателей (ГТД), обрабатываемые методом концевого фрезерования.

На данный момент выполнено много работ по исследованию процесса фрезерования деталей. Получены зависимости, позволяющие априорно устанавливать технологические условия обработки, обеспечивающие на выходе необходимые параметры качества поверхностного слоя детали. Как правило, данная методика полностью не исключает необходимости проведения дальнейших доводочных операций, однако позволяет объединить операцию лезвийной обработки и доводочную в единый комплекс, что приводит к



**Детали ГТД, обработанные фрезерованием**

значительному снижению затрат без снижения качества готовой детали.

Для изготовления деталей из современных труднообрабатываемых материалов: коррозионно-стойких и теплостойких хромистых сталей, деформируемых жаропрочных сплавов на никелевой основе, применяемых в авиакосмической отрасли, требуется значительное увеличение эксплуатационных качеств инструментов, таких как стойкость, скорость резания, прочность и др. Шагом в увеличении стойкости инструмента стало нанесение на его поверхность износостойких покрытий. С тех пор развитие всех инструментальных материалов идет в основном по пути совершенствования методов нанесения покрытий в целях управления их химическим составом, структурой для обеспечения наилучшего сочетания свойств покрытия и основы. Совершенствование технологии позволило создавать наноструктурированные покрытия путем нанесения нанослоев износостойких пленок, каждая из которых выполняет свою функцию, что в комплексе дает синергетический эффект. Покрытия снижают температуру в зоне резания благодаря пониженному коэффициенту трения стружки по задней поверхности инструмента. Этим они повышают стойкость инструмента, что позволяет увеличить скорость резания и максимально снизить время простоев станка на смену инструмента и последующую поднастройку. При незначительном удорожании инструмента с покрытием по сравнению с инструментом без покрытия экономическая эффективность от его использования окупает затраты.

Следует отметить, что исследований, посвященных учету влияния наноструктурированных износостойких покрытий инструмента на параметры качества поверхностного слоя деталей при концевом фрезеровании, недостаточно. Имеются работы, посвященные изучению влияния режимов обработки на отдельные параметры поверхностного слоя деталей, а также работы, направленные на поиск оптимального соотношения "обрабатываемый материал – покрытие". Однако отсутствуют работы по изучению влияния режимов обработки на весь комплекс параметров качества поверхностного слоя.

В связи с этим необходимо разработать теоретические и экспериментальные положения по исследованию влияния наноструктурированных покрытий на параметры качества поверхностного слоя деталей при концевом фрезеровании, произвести поиск оптимальных режимов обработки, позволяющих минимизировать износ инструмента и получить заданные характеристики поверхностного слоя: шероховатость, наклеп, остаточные напряжения.

В ранее выполненных работах расчет остаточных напряжений в поверхностном слое деталей производился без учета упрочнения, в предположении идеальной упругости обрабатываемого материала:

$$\sigma_{н} = \left[ -\beta_d T + \frac{\int\limits_0^{y_{о.н}} E\beta_d T\,dy - \int\limits_{y_{о.н}}^{H} (1-\mu)\sigma_т\,dy}{\int\limits_0^{y_{о.н}} E\,dy} \right] \frac{E}{1-\mu};$$

$$\sigma_{о} = \left[ -\beta_d T + \frac{\int\limits_0^{y_{о.о}} E\beta_d T\,dy - \int\limits_{y_{о.о}}^{H} (1-\mu)\cdot 2\sigma_т\,dy}{\int\limits_0^{y_{о.о}} E\,dy} \right] \frac{E}{1-\mu}, \quad (1)$$

где $\sigma_н$, $\sigma_о$ – напряжения при нагреве и охлаждении соответственно, МПа; $E$ – модуль упругости материала, МПа; $\sigma_т$ – предел текучести обрабатываемого материала, МПа; $\beta_d$ – коэффициент температурного линейного расширения материала обрабатываемой детали, 1/°С; $T$ – температура в зоне резания, °С; $\mu$ – коэффициент Пуассона; $y_{о.н}$, $y_{о.о}$ – границы раздела упругих и пластических деформаций при нагревании и охлаждении соответственно; $H$ – толщина детали, мм.

Для учета упрочнения предполагается использовать формулы В.Ф. Безъязычного

$$\sigma_{ост} = \sigma_т\left(1-\frac{D}{E}\right) + \frac{a_1 A}{1-\mu}\left(\frac{H-y+a_1}{a_1}\right)^{x_2}(E-D) + \frac{a_1 A}{(1+x_2)a_1^{x_2}(1-\mu)} \times$$

$$\times \left[ \frac{ED[(H+a_1)^{1+x_2} - (H-y_{о.н}+a_1)^{1+x_2} - a_1^{1+x_2}] - \frac{(1+x_2)a_1^{x_2}(1-\mu)}{a_1 A} D\sigma_т\left(1-\frac{D}{E}\right)(H-y_{о.н})}{E y_{о.н} + D(H-y_{о.н})} - \frac{E}{H}[(H+a_1)^{1+x_2} - a_1^{1+x_2}] \right];$$

$$y \geq y_{о.н}\ ;$$

$$\sigma_т \leq \sigma_{н\,max} < \sigma_в;\quad \sigma_{о\,max} \leq \sigma_в + \sigma_т\ , \quad (2)$$

где $D$ – модуль упрочнения обрабатываемого материала; $y$ – глубина залегания слоя, в котором определяются напряжения, мм; $a_1$ – толщина сечения среза, мм; $\sigma_в$ – предел прочности обрабатываемого материала, МПа; $A$ , $x_2$ – величины, зависящие от свойств обрабатываемого и инструментального материалов, геометрии режущей части инструмента, режима резания.

Обзор научных работ в сфере фрезерования концевыми фрезами показал, что значительная часть авторов при расчете режимов резания и параметров качества поверхностного слоя руководствуется эмпирическими зависимостями, которые показывают значительную точность только для конкретных условий обработки. При нанесении покрытий на режущий инструмент требуются новые эксперименты для получения новых коэффициентов. Исследования влияния наноструктурированных покрытий на параметры качества поверхностного слоя при фрезеровании концевыми фрезами необходимо строить на теоретических моделях. В этих целях были выбраны модели, разработанные научной школой профессора В.Ф. Безъязычного. В них используется безразмерный комплекс $B$, который входит в формулы, определяющие параметры качества поверхностного слоя деталей:

$$Ra = f(B, ...); \quad \sigma_{ост} = f(B, ...);$$
$$h_c^F = f(B, ...); \quad B = \frac{cБ^x Д^z}{Г^y (1-\sin\gamma)^q}, \qquad (3)$$

где $Ra$ – среднее арифметическое отклонение профиля, мкм; $\sigma_{ост}$ – остаточные напряжения, МПа; $h_c^F$ – глубина наклепа, мкм; $B$ – безразмерный коэффициент, характеризующий степень пластической деформации срезаемого припуска и поверхностного слоя обрабатываемой детали; $Б$, $Д$, $Г$, $x$, $y$, $z$, $q$, $c$ – безразмерные комплексы и коэффициенты, учитывающие особенности процесса резания; $\gamma$ – передний угол инструмента, рад.

В работе [2] установлена связь безразмерного коэффициента $B$ с коэффициентом трения, возникающим при резании:

$$\frac{\mu_1^F}{\mu_2^F} \cong \frac{B_2}{B_1}, \qquad (4)$$

где $B_1$, $B_2$ – безразмерные коэффициенты для материала с новым и известным покрытиями; $\mu_1^F$, $\mu_2^F$ – коэффициенты трения нового и известного покрытий.

Руководствуясь разработанной Р.Н. Фоменко методикой следует определять безразмерный коэффициент $B$ по коэффициенту трения на границе покрытия и материала детали. Это сводит к минимуму число необходимых экспериментов. Однако методика, разработанная Р.Н. Фоменко, применима только для обработки точением, поэтому требуется ее адаптация к процессу фрезерования.

Изложенное свидетельствует о необходимости проведения дальнейших исследований, направленных на изучение влияния наноструктурированных покрытий режущего инструмента на параметры качества поверхностного слоя деталей при фрезеровании концевыми фрезами.

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Титов В.А.** Покрытия режущего инструмента. Состояние вопроса и перспективы // НМ-оборудование. 2004. № 1. С. 26–29.

2. **Фоменко Р.Н.** Исследование процесса обработки точением инструментами с нанопокрытиями с целью обеспечения требуемого качества поверхностного слоя деталей: дисс. ... канд. техн. наук. Рыбинск, 2010. 227 с.

3. **Сутягин В.В., Сайкин С.А.** Повышение ресурса концевого инструмента за счет применения нанокомпозитных PVD-покрытий при обработке титановых сплавов в авиастроении // Упрочняющие технологии и покрытия. 2008. № 5. С. 41–44.

**К вниманию читателей!**

В журнале № 2 за 2014 г. на стр. 3 была допущена опечатка. Вместо **Р.Р. Камадетдинов** следует читать **Р.Р. Камалетдинова.**

УДК 621.781.2

[1]Д.Н. Любимов, [1]К.Н. Долгополов, [2]Е.А. Глазунова,
[3]Э.Л. Мельников, [3]М.А. Сережкин, [3]А.В. Бодарева
*([1]ООО Инжиниринговый центр "ЛИК", г. Сургут;*
*[2]Южно-Российский государственный университет экономики и сервиса, г. Шахты;*
*[3]МГТУ им. Н.Э. Баумана)*
*E-mail: mt13@bmstu.ru*

# Эффекты самоорганизации в узлах трения при эксплуатации в смазочной среде, содержащей твердые наполнители

*Проведено сравнение факторов обеспечения самоорганизации трибосистем, функционирующих в режиме избирательного переноса и при использовании твердых наполнителей смазочных материалов, которые состоят в снижении износа, поддержании при трении неизменной структуры третьего тела и самосогласованном механизме энергетического обмена трибосистемы с внешней средой.*

*Работа построена на основе обобществления, ранжирования и анализа большого количества научной информации по теории изнашивания, исходя из которой показано, что научные основы, заложенные в теории избирательного переноса, справедливы для описания трения различных присадок, отличающихся друг от друга по типу активного вещества и выделяющих способность трибосистем к созданию на контактирующих поверхностях защитных полимолекулярных слоев (защитных пленок).*

***Ключевые слова:*** *избирательный перенос (эффект Гаркунова), самоорганизация, трение, твердые наполнители, минералы.*

*In this paper a comparison of the factors ensuring the self-organization of tribosystems functioning in the mode of selective transfer and when using solid fillers lubricants, which consist in reducing wear, under-holding in friction unchanging structure of the third body and self-consistent fur-winding power exchange tribosystem with the external environment.*

*This work built on the basis of socialization, ranking and analysis of a large number of scientific information on wear theories, based on which it is shown that the scientific foundations in the theory of selective transfer, justice Livs to describe the friction of different additives, differing from each other by the type of the active substance, and to produce the ability of tribosystems to create the protective polymolecular layers (protective films) of the communicate the surfaces.*

***Keywords:*** *selective transfer (Garkunovs effect), self-organization, friction, solid fillers, minerals.*

На сегодняшний день в трибологии, как одной из наиболее динамично развивающихся отраслей технических наук, благодаря совершенствованию методов диагностики триботехнических параметров [1] и развитию экспериментальных средств мониторинга тонких физико-химических процессов, протекающих при контактном взаимодействии твердых тел [2]; появлению теоретических моделей, описывающих механику процесса разрушения при трении [3], накоплено достаточное количество информации, чтобы подтвердить положения, высказанные в опережающих свое время (во многом антогонистических) работах Д.Н. Гаркунова и А.А. Полякова [1–3] о вариационных проявлениях в ходе эволюции трибосистем самоорганизации, высшей иллюстрацией которой, по нашему мнению, служит эффект безызносности, а наиболее изученной формой является избирательный перенос (ИП) [3]. Проблемам реализации ИП при трении посвящено множество научных работ, монографий, разделов справочников, специализированных научных конференций и [1–9]. Проведя анализ литературных источников, мы склоняемся к мнению о существовании более глубокой аналогии в явлении самоорганизации трибосистем, работающих в различных режимах трения, нежели то, что было отражено в классических работах по избирательному переносу.

Например, за последние два десятилетия наряду с известными проявлениями самоорганизации механических систем как автогидродинамические эффекты: "эластогидродинамическая смазка", поддержание "теплового клина", "гидродинамического клина" экспериментально зафиксированы случаи, тождественные самоорганизации механических систем: "эффект аномально низкого трения", "сверхнизкое трение гидратов по стали" [3] и т.д., а наиболее выдающийся случай проявления самоорганизации при трении в живых организмах: "свойство синовиальной среды обеспечивать высокую антифрикционность хрящей в суставе живого организма посредством реализации в узле трения мезоморфного состояния смазки", дополнительно раскрытый в работах известной плеяды белорусских трибологов [4], позволяет судить о его эквивалентности эффекту безызносности.

Сегодня классические (с точки зрения избирательного переноса) пары трения "медный сплав – сталь" в

среде, содержащей спиртоглицериновую смесь, дополнились металлополимерными сопряжениями, функционирующими в условиях "сухого" трения и имеющими в качестве наполнителей комплексные соединения, их лиганды, соли и т.д. [2]; парами трения "стать–сталь" с различными вариациями смазочных сред и присадок к ним [6], из которых все чаще в практику триботехнического материаловедения входят твердые и сверхтвердые наполнители в дисперсном и ультрадисперсном состояниях: минералы (слоистые силикаты) [7], твердые растворы (сиалон), органокремнеземы, халькогениды металлов (дисульфид, диселенид молибдена), наноструктуры углерода [8] и др.

В работе [3] обосновывается мнение, что созданная А.А. Поляковым модель эволюционного поведения трибосистем применима и для систем, в которых отсутствуют признаки безызносности, но обладающих определенным набором свойств, присущих различным формам проявления самоорганизации при трении. Поэтому, взяв за основу механизмы регулирования состояния структуры поверхностного слоя в условиях избирательного переноса как высшей формы самоорганизации при трении [5], постараемся наметить схожие черты, сравнивая их с механизмами трения "новых" присадок – твердых наполнителей.

Достоинство перечисленных твердосмазочных материалов состоит в способности их сверхмалого количества (не более 0,01...0,1 % мас.) расширять нагрузочно-скоростные пределы функционирования узлов трения, снижать коэффициент трения, ускорять приработку сопряжений, улучшая динамическую адаптацию трибосистем к изменяющимся в процессе работы условиям изнашивания и режимам трения [6]. Выделяя несколько уровней самоорганизации трибосистем [7], считают, что в адаптивных трибосистемах структура законов развития фрикционных процессов определяется энтропийной природой генезиса силы трения, из-за которой корреляция между коэффициентом трения, температурой, интенсивностью изнашивания может быть неоднозначна. Эта форма самоорганизации трибосистемы существует благодаря наличию управляющих сигналов положения системы в состоянии, близком к равновесному, и корректировки ее положения вблизи него внутренними механизмами. В такой системе в отличие от эффекта безызносности наблюдается неуклонный рост конфигурационной энтропии, замедление которого возможно, например, упрочнением поверхности.

В классическом примере ИП суммарное действие диффузионно-дислокационных механизмов вызывает делокализацию деформации, растяжение процесса упрочнения во времени за счет диффузионной релаксации напряжений и возможность создания в процессе деформации полигонизированной ячеистой структуры, обусловливающей многократное изменение микротвердости поверхности. Приспособительные механизмы изменений в поверхностном слое при использовании же твердых наполнителей смазочных материалов могут быть отнесены к адаптивной форме самоорганизации трибосистемы в виде структуры ячеек, также выполняющих функцию саморегулирования микропараметров поверхностного слоя. В работе [7] с использованием представлений линейной механики разрушения материалов и экспериментальных данных доказано, что присутствие в смазочном материале сверхтвердых частиц ультрадисперсных алмазов при трении пластичных материалов приводит к формированию в их поверхностных слоях наноразмерной ячеистой субструктуры, эффективно поглощающей энергию трения, повышая износостойкость сопряжения. В работе [7] сделан прогноз о возможности использования для этих целей минералов, которые представляют собой источники для производства энергии высокого уровня. Г. Польцер и В. Эбелинг показали, что также можно возбуждать процессы самоорганизации при добавлении к смазочному материалу микроабразива с диаметром зерна менее 5 мкм. Частицы наполнителей, приводя к изменению микротвердости поверхностного слоя, в зависимости от соотношения физических констант материалов взаимодействующих тел и типа напряженного состояния в контакте могут оказать синергетический эффект на обеспечение трибостойкости сопряжения или промотировать его катастрофический износ.

При исследованиях минеральных наполнителей установили склонность поверхностных слоев металлов к образованию ячеистой структуры, воспроизводящей их грубогетерогенную природу, отчетливо регистрируемую методами микроскопии. Последующие работы по теории формирования минеральными наполнителями защитных пленок, выполненные с применением современных методов рентгеновской спектроскопии, показали наряду с наличием на поверхности трения ячеистой структуры микроячеистое строение модифицированного поверхностного слоя, запирающее релаксацию латентной (запасаемой поверхностями трения) энергии, происходящую путем развития в полосах скольжения микротрещин и образования новых поверхностей, обладающих избыточным уровнем свободной энергии, за счет делокализации деформации и увеличения резерва пластичности материала поверхностного слоя путем непрерывной перестройки кристаллической структуры. Микропоры, снижая комплекс физико-механических свойств материала, дополнительно служат препятствием для роста трещин. Однако этот процесс в отличие от избирательного переноса, снижение уровня напряжений при котором осуществляется благодаря диффузионно-дислокаци-

онной неустойчивости (образованию, миграции, агломерации точечных дефектов), имеет ограниченную энергоемкость и, соответственно, не способен длительное время обеспечивать процессы обратимой перестройки кристаллической структуры защитного слоя и автокомпенсации износа поверхностей трения.

Перечисленные явления профессор Л.И. Погодаев объясняет тем, что "большие потоки энергии через сравнительно тонкие деформируемые слои материала создают условия для самоорганизации. Например, при напряжении трения 10 МПа и скорости смещения 0,1 м/с в слой металла толщиной 5 мкм вводится поток энергии плотностью $2 \cdot 10^{11}$ Дж/(с·м$^3$), превышающий энергию связи атомов в рассматриваемом слое..." [3]. Особые структуры (пластины и соты) таких твердых смазочных материалов, как дисульфид молибдена и графит, также приводят к снижению сил трения и интенсивности изнашивания вплоть до достижения уровней сверхнизкого трения [4].

К адаптивным формам самоорганизации можно отнести образование регулярного рельефа поверхности в виде двух типов диссипативных структур – ротационных (0,1...0,5 мкм) и периодических в виде волнистости на поверхностях трения с шагом 10...20 мкм. Аналогичная картина имеет место при гидроабразивном изнашивании нержавеющих сталей, при котором в зонах местного изнашивания пластическая неустойчивость деформируемого слоя сопровождается образованием регулярного рельефа [7]. В работе [3] указан оптимальный для осуществления избирательного переноса диапазон шероховатости поверхности. Так, в условиях вращательного движения исходная шероховатость поверхности трения медного образца *Ra* лежит в пределах 0,106...0,620 мкм. При использовании ультрадисперсных порошков β-сиалона серпентинов удалось получить приведенные шероховатости исходных образцов, попадающие в указанный диапазон.

В исследованиях, выполненных доктором технических наук А.С. Кужаровым с сотрудниками при инициации избирательного переноса в спиртовых средах, и кандидатом технических наук Д.Н. Любимовым с сотрудниками при "сухом" трении металлополимерных сопряжений, показано, что ожидаемая металлоплакирующая пленка меди имеет установившуюся шероховатость $Rz \geq 2...20$ нм, при которой коэффициент трения и интенсивность изнашивания имеют весьма низкие значения. Это серфинг-пленка – одна из пленок, которая наравне с сервовитной осуществляет регуляцию механизмов самоорганизации в режиме безызносности.

Важной особенностью эффекта пленки при ИП является специфический механизм смазки, основанный не на адсорбции, а на хемосорбции через координационную связь, а также проявление при ИП хемомеханического эффекта. Близкие к указанным механизмы плакирования поверхностного слоя металла наблюдались при участии в качестве активного агента смазочной среды минералов. Формирующийся на поверхности трения защитный смазочный слой имеет вид двухслойной смазки. Нижний слой представляет собой твердое защитное микропористое покрытие, связанное с поверхностью жесткими, направленными ковалентными связями, имеющее высокую коррозионную, абразивную и термическую стойкость. Это покрытие прочно удерживает смазку на поверхности трения, уменьшая вероятность истощения смазочного слоя в критических режимах фрикционного взаимодействия с приданием деталям трения способности к самосмазыванию.

Верхний слой – слой трибополимера, свойства которого описаны в работе [3]. В соответствии с терминологией избирательного переноса, предложенной А.А. Поляковым, слой трибополимера придает трибосопряжению высокие антифрикционные свойства.

В режиме трения при ИП поверхность также защищена многослойным покрытием, состоящим из сервовитной пленки – пленки меди, находящейся в особом дезорганизованном состоянии, обладающей огромной площадью абсорбции, эффективно удерживающей комплексом сорбционных сил серфинг-пленку, представляющую собой пленку из ассоциированных комплексных соединений, и дополнительно за счет аттракционных сил – коллоидный слой смазочного материала.

Еще одной чертой, сближающей функционирование трибосистемы с перечисленными типами наполнителей и в режиме ИП, является то, что генерация механизмов, обеспечивающих лучшие триботехнические параметры, здесь также имеет узкий, специфический для каждого вида используемого в качестве активного агента вещества диапазон, ограничивающийся, например, для минералов высокими температурами трения.

Как видно, при избирательном переносе и трении дисперсных твердых наполнителей много сходных черт, инициирующих механизмы самоорганизации. Но несмотря на указанные сходства, проявление самоорганизации при использовании минералов сопровождается неуклонным изменением объема механической системы и расходованием ее активных агентов, а выявленные признаки приспосабливаемости в виде механизмов поверхностного кооперативного массопереноса в форме трибореологических и трибохимических ячеек, наблюдаемых как периодические структуры на поверхности трения, не характеризуются устойчивой неравновесностью и со временем, вследствие энтропийного фактора, нарушаются. Неоспоримым остается одно: обе группы материалов обладают нераскрытым научно-техническим потенциалом и перспективами для дальнейших научных исследований и

практического применения для повышения качества смазочных материалов.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. **Гаркунов Д.Н., Крагельский И.В., Поляков А.А.** Избирательный перенос в узлах трения. М.: Транспорт, 1969. 104 с.

2. **Гаркунов Д.Н.** Научные открытия в триботехнике. Эффект безызносности. Водородное изнашивание металлов. М., МСХА, 2004. 384 с.

3. **Поляков А.А.** Опыт исследования диссипативной структуры избирательного переноса в металлической пленке при трении (динамическая трибология) // Трение и износ. 1992. № 2 (13). С. 388–402.

4. **Pinchuk L.S., Nikolaev V.I., Tsvetkova E.A., Goldade V.A.** Tribology and biophysics of artificial joints. London, Amsterdam: Elsevier, 2006. 350 p.

5. **Поляков А.А.** Самоорганизация структуры избирательного переноса // Долговечность трущихся деталей машин: сб. науч. трудов. Вып. № 3. М.: Машиностроение, 1988. С. 45–89.

6. **Поляков С.А.** Закономерности формирования структуры приповерхностных слоев трибосопряжений в связи с повышением их работоспособности на основе динамической адаптации к условиям эксплуатации: автореф. дис. ... д-ра техн. наук. Москва, 2011. 32 с.

7. **Польцер Г., Эбелинг В.** Внешнее трение твердых тел, диссипативные структуры, самоорганизация // Долговечность трущихся деталей машин: сб. науч. трудов. Вып. № 3. М.: Машиностроение, 1988. С.89–95.

8. **Алферов Ж.И., Асеев А.Л., Гапонов С.В. и др.** Наноматериалы и нанотехнологии // Микросистемная техника. 2003. № 8. С. 3–13.

9. **Мельников Э.Л., Щедрин А.В., Гаркунов Д.Н., Гаврилюк В.С., Бекаев А.А.** Расширение возможностей комбинированного волочения на основе применения металлоплакирующих смазок // Вестник машиностроения. 2011. № 4. С. 38–42.

10. **Любимов Д.Н., Долгополов К.Н.** Фундаментальные основы эволюции трибосистем. Шахты, ФГБОУ ВПО "ЮРГУЭС", 2011. 95 с.

УДК 621.781.2

**[1]Д.Н. Гаркунов, [1]В.Г. Бабель, [2]Э.Л. Мельников**
*([1]Отделение безызносности машин и механизмов АПК, Университет машиностроения, [2]МГТУ им. Н.Э. Баумана)*
*E-mail: mt13@bmstu.ru.*

# Металлоплакирующие смазочные материалы

*Рассмотрена проблема обеспечения нормального режима работы и снижения износа сопряженных пар трения. Проведен сравнительный анализ защитного действия масляных пленок с различными присадками. Показано, что металлоплакирующие смазочные материалы дают наибольший эффект уменьшения трения и износа контактирующих поверхностей.*

***Ключевые слова:*** *смазочные материалы, трение и износ, металлоплакирующие смазочные материалы.*

*The article considers the problem of ensuring the regular regime and reducing the wear of friction pairs of conjugate. Held compare-depth analysis of the protective effect of oil films with various additives. It is shown that the anti-friction lubricants give the greater effect of the reduction of friction and wear of contact surfaces.*

***Keywords:*** *lubricants, friction and wear, anti-friction lubricants.*

Многие десятилетия (более 60 лет) для обеспечения нормального режима работы и снижения износа сопряженных пар трения в смазочные материалы для химического модифицирования поверхностей трения вводились противоизносные-противозадирные присадки, включающие элементы V...VII групп системы Менделеева, в основном S, C1, P-содержащие соединения в количестве до 15 %.

Общим в механизме действия защиты поверхностей трения таких присадок является образование тонких пленок – около 0,1 мкм – в виде сульфидов, хлоридов, фосфидов в результате химического взаимодействия присадок или продуктов их химического распада с контактирующими поверхностями.

Роль модифицирующих слоев состоит в насыщении свободных связей кристаллической решетки ювенильных поверхностей, обнажающихся в процессе пластической деформации при трении, и препятствовании их схватыванию и разрушению на глубину.

В случае применения сероорганических соединений (толщина пленки 300...400 нм) пленка стабильна до температуры ~800 °С; при использовании хлорсодержащих соединений образующаяся пленка полимолекулярного слоя хлоридов железа $FeCl_2$, $FeCl_3$ стабильна до 300 °С. Пленки фосфидов железа возникают при сравнительно низких температурах (~200 °С). Фосфорсодержащие присадки слабо повышают противозадирные свойства, но обладают антифрикционными. По противозадирным свойствам эффективны присадки, содержащие одновременно серу и хлор.

По-видимому, хлориды, образующиеся на поверхности металла, повышают смазочные свойства вследствие большей пластичности, а сульфиды усиливают их действие, обеспечивая больший противозадирный эффект. При всех режимах трения хлорсодержащие присадки более эффективны и их активность зависит не столько от содержания хлора в сложной органической молекуле, сколько от подвижности (хлор в алкильной группе и хлор в бензоле).

Помимо термического разложения присадки могут подвергаться и гидролизу, и тогда в смазочной среде появляются активные продукты.

Для подавления кислотности, для защиты от коррозии, в смазочную композицию вводились щелочные добавки. Щелочное число являлось одним из показателей ресурса рабочего масла.

Защита трущихся поверхностей применением сложных элементоорганических соединений продолжается до тех пор, пока не израсходуется присадка, после чего наблюдается ускоренный износ от каталитического действия обнаженного металла и коррозии. Недостатком использования таких присадок является и отсутствие компенсации повреждений и износа.

В связи с ужесточением условий эксплуатации машин и механизмов, большими тепловыми и фрикционными нагрузками традиционно применяемые элементоорганические присадки не могут обеспечить удовлетворения требований, предъявляемых к смазочным материалам. В решении этой проблемы получает развитие принципиально новое направление в создании смазочных материалов, основанное на научном открытии эффекта безызносности с использованием в узлах трения металлоплакирующих смазочных материалов (МСМ), обеспечивающих высокую износостойкость деталей машин, снижение расхода горюче-смазочных материалов и энергозатрат.

Впервые термин "металлоплакирующий" появился в 1962 г. в связи с изобретением смазочного материала, реализующего эффект безызносности (избирательный перенос)[*].

Металлоплакирование сопряженных поверхностей происходит в процессе работы узла трения при использовании смазочного материала, обеспечивающего условия режима избирательного переноса (эффекта безызносности), и существенно отличается от граничного трения, где определяющими являются адсорбция смазки и механическое взаимодействие. Если в качестве присадки используется металлический порошок, то образование пленки этого металла на поверхности трения может осуществляться либо путем намазывания (заполнения) неровностей, т.е. путем механической адгезии, либо под воздействием больших контактных давлений, когда частицы металла могут вступать во взаимодействие друг с другом и с подложкой и образовывать прочную металлическую связь. При этом смазочная среда должна быть химически индеферентной по отношению к металлам, но достаточно вязкой для предотвращения слипания и оседания частиц металла. Такой процесс реализуют для меднения, латунирования различных поверхностей.

К МСМ относятся смазочные материалы, обеспечивающие образование сервовитной пленки на сопряженных поверхностях трения, реализующие эффект безызносности.

При введении в смазочную среду на минеральной или синтетической основе мягких металлов переменной валентности в различных формах соединений (порошки, оксиды, гидроксиды, металлорганические соединения, соли таких металлов, как свинец, олово, хром, медь, цинк и др.) на поверхностях трения в местах фактического контакта образуется защитная металлическая пленка толщиной 1...2 мкм, которая в 10 раз превышает толщину пленок, образующихся при смазках с присадками химического действия. Благоприятное действие пленки металла будет в том случае, если ее толщина в зоне контакта будет в несколько атомных слоев (Ф.П. Боуден).

Для осуществления процесса металлоплакирования с реализацией эффекта безызносности в смазочном материале наряду с металлоплакирующим соединением необходимо наличие поверхностно-активных веществ (ПАВ) и соединений, способных растворять оксиды металлов.

ПАВ участвуют в образовании комплексов, сольватированных частиц, в создании устойчивой дисперсной системы.

Существенное значение в процессе металлоплакирования имеют электрокинетические явления.

В зазоре между трущимися поверхностями генерируется ЭДС при высокой напряженности электрического поля, благодаря чему и осуществляется перенос ионов, коллоидных частиц, молекул ПАВ. Среди различных электрических явлений при трении особая роль принадлежит экзоэлектронной эмиссии, которая характеризуется излучением электронов с поверхности твердого тела, возбужденной различными способами, в том числе трением.

При трении в условиях пластического деформирования возникают дефекты кристаллической решетки, происходят структурные превращения; слабо связанные электроны в возбужденных атомах перебрасываются на более высокие энергетические уровни, при этом кинетическая энергия свободных электронов увеличивается. Трение, повышая энергию решетки

[*] А.с. № 179609 от 14.05.1962. Д.Н. Гаркунов, В.Н. Лозовский, В.Г. Шимановский. Получение и исследование металлоплакирующих смазочных материалов с применением металлов переменной валентности.

металлов, снижает работу выхода электронов, вызывает возникновение экзоэлектронной эмиссии, интенсивность которой зависит от состояния поверхности, от режимных факторов трения и других условий (давления, температуры).

Эмитированные свободные электроны ювенильной поверхности взаимодействуют с присутствующими в смазочной среде акцепторами (ионы металлов), восстанавливая их до нейтральных атомов (трибовосстановительный процесс) с формированием сервовитной металлоплакирующей пленки на рабочей поверхности.

Свойства сервовитной пленки, образовавшейся в процессе трения, иные чем у обычного металла, полученного из руд. Такое различие связано с условиями образования пленки.

Изучение структуры сервовитной пленки методом скользящего пучка рентгеновских лучей (угол не более 1°) показало, что ее верхние слои имеют значительные структурные изменения по сравнению с лежащими ниже слоями. В приповерхностном слое нет скопления дислокаций (повреждений), приводящих к разрушению поверхности, пленка не способна к наклепу, пориста, имеет малые сдвиговые усилия, низкий коэффициент трения и обладает высокой несущей способностью. ПАВ, вводимые в смазочные материалы или образующиеся при трении в самой смазке, легко хемосорбируются на поверхности такой пленки, образуя хемосорбированный слой (серфинг-пленка), что способствует дополнительному смазыванию и снижению коэффициента трения.

В режиме избирательного переноса (безызносности) протекают самоорганизующиеся процессы, приводящие при трении к диссипативной структуре, которая характеризуется гомогенной средой, наличием фазового кинетического перехода (перехода от консервативного передвижения дислокаций к переползанию), обменом энергией и веществом с внешней средой (образованием и распадом комплексных соединений в смазке), ускорением потоков диффузии при пластической деформации. Благодаря этим процессам диссипативная структура может существовать без финального исхода.

Среди металлов, вводимых в смазочные материалы, наибольшее распространение получили медь и ее производные. Давно известно традиционное использование органических солей меди в качестве гомогенных катализаторов окисления углеводородов. Позднее были обнаружены способность органических соединений меди к антиокислительному действию и возможность усиления эффективности органических антиоксидантов путем координирования их функциональных групп с соединениями меди.

С открытием избирательного переноса все чаще стали появляться работы с применением соединений переходных металлов для повышения износостойкости узлов трения.

Добавка незначительного количества комплексообразующего агента к смазкам заметно улучшает их смазочные свойства при трении медного сплава по стали, а введение готового комплекса меди – при трении стальных поверхностей.

Следует заметить, что для повышения износостойкости и несущей способности различные металлосодержащие добавки чаще всего использовались в консистентных смазках, буровых растворах, смазочно-охлаждающих технологических системах (СОТС). Гораздо меньше рекомендаций по применению их в маслах, что связано, очевидно, с более высокими требованиями, предъявляемыми к маслам: сохранение реологических свойств, растворимость, стабильность системы и др. Авторами впервые показана возможность применения неорганических солей – галогенидов металлов переменной валентности в качестве добавок к маслам для улучшения триботехничеких свойств поверхностей трения.

Образующийся слой меди содержит продукты механохимических превращений в щелочной среде, он довольно прочен и эластичен и может быть удален с поверхности только механической обработкой и травлением. На порошковом материале слой меди образуется позже, он более рыхлый.

Из разработанного железно-медно-стеклянного материала были изготовлены втулки подшипников скольжения ванн линии мерсеризации тканей, машин отбельного и отделочного цехов красильно-отделочных фабрик. Подшипниковые узлы работали в растворах едкого натра с концентрацией 40 г/л.

В процессе работы на поверхностях трения стального вала и железно-медно-стеклянного подшипника визуально наблюдалась тонкая медьсодержащая пленка.

С учетом допустимого значения рабочего зазора подшипникового узла и зафиксированной интенсивности изнашивания пары трения срок службы подшипников скольжения из разработанного материала составляет 5...6 лет, т.е. в 2–3 раза больше, чем обычно.

*Материалы для слаботочных электрических контактов.* В приборостроении широко используют скользящие контакты, работающие в условиях "сухого" трения под воздействием различных токовых нагрузок. Часто к этим условиям помимо электрических параметров (таких, как постоянство переходного сопротивления, низкий температурный коэффициент электросопротивления) предъявляются требования по определенному моменту троганья. Одной из важных характеристик является высокая износостойкость материалов контактной пары.

В связи с требованиями надежного контактирования для изготовления скользящих контактов используются сплавы из благородных металлов, которые способны длительное время противостоять окисле-

нию и, следовательно, сохранять неизменным контактное сопротивление.

Практика использования благородных металлов показала, что не все материалы обладают достаточной надежностью при работе скользящих контактных пар. Подбор материалов контактных пар, как правило, производится эмпирически. Были проведены исследования работоспособности сплавов благородных металлов на основе золота, палладия, платины и серебра Е. Определялись коэффициенты трения контактных пар, их износостойкость, изменение профиля поверхности при трении, влияние формы контактирующих поверхностей и т.п.

Дальнейшая работа по выбору менее дефицитных материалов для скользящих контактов показала, что явление избирательного переноса происходит и на металлокерамических сплавах на основе серебра марок ПдСрН70-5 и ПдСр70.

Явление избирательного переноса, в частности золота, обеспечивает минимальный износ скользящих слаботочных электрических контактов. В связи с таким эффектом было предложено предварительно обрабатывать фетром с маслом ВМ-4 рабочую поверхность золотомедного сплава (ЗлХ-0,5; ЗлХ-2,8) до получения на этой поверхности тонкой пленки золота толщиной 1...1,5 мкм.

В процессе работы образовавшийся слой золота переносится на щетку, размазывается по поверхности трения.

Для проверки работоспособности контактов, на которых был предварительно образован слой золота технологической полировкой фетром, были проведены сравнительные испытания. Испытания показали более высокую износостойкость обработанных фетром колец (износ 4,1 мкм) по сравнению с отожженными (износ 17,6 мкм).

*Присадки, композиции и смазочные материалы, реализующие эффект безызносности*. Наибольшее распространение получили металлоплакирующие присадки к смазочным материалам (СМ), образующие медную и оловянную сервовитные пленки:

металлоплакирующая присадка МКФ-18 – применяется в ряде отраслей: в тяжелом машиностроении, станкостроении, сельскохозяйственной технике, на рыболовецком флоте, автомобильном транспорте;

смазка "Атланта" – изготовляется на Московском экспериментальном нефтемаслозаводе, применяется в тяжелонагруженных узлах самолетов типа "Су";

смазка "Медея" – применяется в узлах трения горно-добывающего и перерабатывающего оборудования в Казахстане;

маслорастворимая многофункциональная металлоплакирующая присадка "Валена" (по ТУ-0257-001-17368431–05) изготовляется на Кусковском заводе консистентных смазок, применяется в узлах трения горно-добывающего и перерабатывающего оборудования в Казахстане, в тяжелонагруженных узлах трения железнодорожного транспорта;

смазка "Пума М" – изготовляется на Кусковском заводе консистентных смазок, применяется для смазки пары трения "колесо–рельс". Применяется на железнодорожном транспорте.

За рубежом применяются такие металлоплакирующие присадки, как "Металл-5" (Швейцария, Франция), "Лубри-фильм-металл" (Италия, Франция), "Слюдер 2000" (Англия), "Реловер" (США) и др.

Проведенные сравнительные испытания российских и зарубежных металлоплакирующих смазочных материалов показали, что российские не уступают зарубежным, а некоторые из них даже превосходят.

Использование металлоплакирующих СМ позволяет повысить долговечность узлов трения (в 2–3 раза), снизить потери на трение (на 30...50 %) и тем самым повысить КПД машин и оборудования, уменьшить расход СМ (в 2–3 раза), увеличить период между смазочными работами (до 3 раз).

**Данные об использовании избирательного переноса (безызносного трения) в машинах и оборудовании**

| Машины, оборудование | Узлы трения | Применяемый смазочный материал |
|---|---|---|
| Самолеты | Тяжелонагруженные узлы шасси | Металлоплакирующие смазки "Атланта", "Велена" и "Сервовид" |
| Тяжелое оборудование завода "Уралмаш" и Новокрамоторского машиностроительного завода, экскаваторы, редукторы, станки для бурения, металлургическое оборудование | Основные узлы трения, подшипники, зубчатые передачи | То же |
| Оборудование и машины морского флота | Дизели морских судов, палубное оборудование | – " – |
| Тяжелые автокраны | Поворотное устройство, ролики и направляющие | – " – |

*Продолжение табл.*

| Машины, оборудование | Узлы трения | Применяемый смазочный материал |
|---|---|---|
| Кузнечно-прессовое оборудование | Основные узлы трения | – " – |
| Строительные и дорожные машины, экскаваторы, бульдозеры | Основные узлы трения, ковши и др. | Металлоплакирующие смазочные материалы типа СМ-01 и присадки МКФ-18У |
| Шахтные комбайны типа 1К-У, К-ЮЗ и др. | Зубчатое зацепление редукторов | Металлоплакирующие смазки типа "Диставик" |
| Насосы и другое оборудование магистральных нефтепроводов, электробуры, электродвигатели для погружных насосов, мощные турбогенераторы, герметичные аппараты при производстве сорбита | Уплотнения, узлы разгрузки | Спеченный материал из карбидов вольфрама, никеля, меди |
| Прядильные машины | Подшипники качения и скольжения | Металлоплакирующая смазка СПМ-5 |
| Швейное оборудование | Механизм челнока, игловодитель и др. | Металлоплакирующая присадка типа МКФ-18 |
| Обувное оборудование | Узлы трения кривошипа, кулисы и др. | Металлоплакирующая присадка МКФ-18, финишная антифрикционная безабразивная обработка (ФАБО) |
| Трикотажное оборудование | Направляющие кареток, вязальный механизм | То же |
| Оборудование для обработки жаропрочных материалов | Режущий инструмент | Металлоплакирующая присадка |
| Автомобили "ЗИЛ", "ГАЗ", "ВАЗ", "КамАЗ", "МАЗ" и др. | Подшипники качения и скольжения, цилиндры двигателей | Металлоплакирующие смазки типа ПСМ, ФМС, присадка МКФ-18У |
| Двигатели автомобилей "КамАЗ", "ЗИЛ", "МАЗ" и др. | Подшипники качения и скольжения, пара "цилиндр–поршень" | Металлоплакирующие смазки, ФАБО |
| Двигатели тракторов | То же | То же |
| Автобусы, троллейбусы | Узлы сцепляющего устройства | Металлоплакирующие смазки типа ФМС |
| Дизели тепловозов | Цилиндро-поршневое кольцо, поршневое кольцо с бронзовой вставкой | Металлоплакирующая присадка |
| Скоростемеры и манометры локомотивов, тяговые электродвигатели | Шестеренная и зубчато-реечная передачи, подшипники качения | Металлоплакирующие смазки типа ПМС |
| Подбивочные и рихтовочные машины | Подшипники качения и скольжения | То же |
| Бытовые холодильники | Узлы трения, компрессоры | Металлоплакирующая присадка МКФ-18Х |
| Горно-шахтное оборудование | Подшипники качения и скольжения шарошечных машин | Металлоплакирующая смазка |
| Насосы фунтовые, песковые, шламовые | Манжетные уплотнения, уплотнения штоков | Композиционный полиуретан, наполненный медью |
| Карьерные экскаваторы, кузнечно-прессовое оборудование | Подшипники скольжения | Металлоплакирующая смазочная композиция (МСК) "Валена" |
| Оборудование по спеканию синтетических алмазов | Пресс-формы | ФАБО |
| Химические аппараты | Нижняя концевая опора | Наплавка сплавом релит-медь |
| Компрессоры разных типов | Цилиндры и поршневые кольца | ФАБО |
| Машины трения вращательного и возвратно-поступательного движения | Пары "роликоподшипник–ролик", "колодка–ролик", "палец–пластина (диск)" | Смазочные материалы с присадками и без присадок |
| Железнодорожный транспорт | Рельсы, колесные пары, подшипники качения | Металлоплакирующая смазка "Пума" с МСК "Валена" |

УДК 621.787.6

**[1]Е.С. Сергеев, [1]М.А. Зинин, [2]А.В. Щедрин, [3]А.О. Поляков, [4]Н.Ю. Чихачева, [5]Д.Н. Гаркунов, [6]Э.Л. Мельников**
*([1]ОАО "НПП "Респиратор", г. Орехово-Зуево;*
*[2]Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ),*
*[3]ООО МЗ "Тонар", г. Губино, [4]СОШ № 1, г. Покров;*
*[5]Академия проблем качества РФ, Москва; [6]МГТУ им. Н.Э. Баумана)*
*E-mail: mt13@bmstu.ru*

# Новые направления самоорганизации контактных процессов в методах лезвийной, деформирующей и комбинированной обработки

*С использованием алгоритмических процедур "систем искусственного технологического интеллекта" синтезированы инновационные направления самоорганизации контактных процессов в методах лезвийной, деформирующей и комбинированной обработки путем регуляризации микрогеометрии поверхности соответствующих инструментов и использования перспективных способов применения современных металлоплакирующих смазок, реализующих фундаментальное научное открытие "эффект безызносности при трении Гаркунова–Крагельского".*

***Ключевые слова:*** *системы искусственного технологического интеллекта, трибологический анализ технологических объектов, регулярный микрорельеф, металлоплакирующая смазка, усилие обработки, качество обработки.*

*With use of algorithmic procedures of "systems of artificial technological intelligence" innovative directions of self-organizing of contact processes in methods of machining job by a regularization of micro geometry of a surface of suitable tools and use of perspective modes of application of the modern lubricants realizing a fundamental discovery "effect of zero wear are synthesized at a friction Garkunova–Kragelsky".*

***Keywords:*** *systems of artificial technological intelligence, the assaying of technological plants, a regular microrelief, metal-cladding lubricant, effort of handling, quality of handling.*

Как свидетельствует современная научная и промышленная статистика, актуальной проблемой существующих и инновационных методов обработки резанием, деформированием, включая комбинированные технологии, является управление контактными процессами, важнейший из которых трение. Существующие инновационные инструментальные материалы и методы упрочнения рабочих элементов обрабатывающего инструмента в настоящее время полностью исчерпали резервы существенного повышения износостойкости [1–3]. С другой стороны, как показывает системный трибологический анализ технологических объектов [4], целенаправленный синтез путей кардинальной реорганизации (уменьшения), а по возможности и самоорганизации контактных процессов возможен с применением новых физических принципов.

Наиболее кардинальными принципами такого уровня являются регуляризация микрогеометрии поверхности обрабатывающих инструментов и применение современных металлоплакирующих смазок, реализующих фундаментальное научное открытие – "эффект безызносности при трении Гаркунова–Крагельского"[4].

Как показали выполненные производственные испытания на примере методов деформирующего и комбинированного, деформирующе-режуще-выглаживающего прошивания при получении "классных" отверстий в заготовках из труднообрабатываемых материалов, регуляризация микрогеометрии поверхности деформирующих элементов соответствующих инструментов позволяет существенно (от двух раз и более) повысить стойкость, а также качество обработки в целом. Это объясняется большей "маслоемкостью" регулярной микрогеометрии по сравнению с иррегулярной, полученной, как правило, шлифованием и доводкой. При этом технологическая смазка, запасенная в больших количествах в канавках регулярного микрорельефа, выдавливается обрабатываемым материалом в процессе воздействия на него, существенно минимизируя трение, износ и полностью нейтрализуя адгезионные явления.

Более высокое качество обработки объясняется тем, что каждый выступ регулярного микрорельефа (рис. 1) является деформирующим элементом, оказывающим многоцикловое воздействие на поверхностный слой заготовки на микроуровне.

Применительно к комбинированной, деформирующе-режущей обработке регуляризация микрогеометрии поверхности деформирующих элементов, осуществляющих предварительное перед резанием деформирующее воздействие на поверхностный слой заготовки, позволяет существенно (до 1,5 раз) снизить усилие последующего резания.

С использованием алгоритмических процедур "систем искусственного технологического интеллекта" [4] был синтезирован метод комбинированного прошивания отверстий с самовозбуждаемым противодавлением технологической смазки по канавкам регулярной микрогеометрии поверхности инструмента. Как пока-

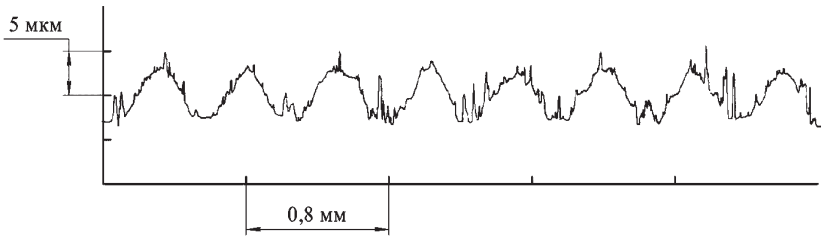



**Рис. 1. Продольная профилограмма поверхности калибрующей ленточки деформирующего инструмента в виде канавок радиусом 7,5 мм и шагом 0,5 мм (марка обрабатываемой стали 9ХС; глубина канавок 10 мкм; ширина канавок 0,5 мм; шероховатость после обработки $Ra$ = 1,791 мкм)**

зали выполненные комплексные исследования, реализация таким образом более благоприятного режима трения позволяет существенно уменьшить крайне негативную адгезионную составляющую суммарного усилия обработки [4], резко ухудшающую ее качество и снижающую стойкость инструмента.

Кардинальное изменение контактных процессов имеет место при комплексном применении регулярной микрогеометрии поверхности инструмента и металлоплакирующих смазок на основе современной маслорастворимой, медьсодержащей присадки "Валена". Как показали исследования [5], реализация данного системно синтезированного решения [4] в зависимости от концентрации присадки позволяет стабильно уменьшить усилие обработки в среднем на 25...30 % и максимум на 59 %. Дополнительно при этом почти в два раза повышается геометрическое качество поверхностного слоя получаемых изделий. Такой эффект объясняется образованием на инструменте (рис. 2) и на заготовке слоя медной сервовитной пленки.

Применительно к исследованиям [5] в условиях технологической реализации фундаментального научного открытия "эффект безызносности при трении Гаркунова–Крагельского" образующаяся сервовитная медная пленка обладает следующими феноменальными физическими свойствами: она обеспечивает исключение прямого контакта заготовки и рабочих поверхностей инструмента; интенсивное пластифицирование поверхностного слоя заготовки в процессе режущего, деформирующего и комбинированного воздействия ("эффект Ребиндера"). Выявленный абсолютно новый феномен заключается в росте эффекта по снижению усилия обработки по мере увеличения степени деформации заготовки.

Более интенсивное формирование антифрикционной сервовитной пленки может быть осуществлено за счет самовозбуждаемого или принудительного истечения металлоплакирующих смазок по канавкам регулярного микрорельефа рабочей поверхности инструмента по аналогии с работой [6].

Таким образом, технологическое трение из разрушительного процесса превращается в самоорганизующееся созидательное явление, имеющее аналогию среди объектов "живой" природы (в суставах скелета человека и животных).

Окончательный вариант воздействующей поверхности лезвийного, деформирующего или комбинированного инструмента в условиях различных технологий применения металлоплакирующих смазок и самоорганизации контактных процессов будет иметь следующую архитектуру: регулярный микрорельеф с пленочным одно- или многослойным покрытием. Причем радиусы при вершинах выступов регулярного микрорельефа исключают концентрацию напряжений в слое покрытия (см. рис. 1) [4]. Глубина канавок регулярного микрорельефа больше толщины износостойкого покрытия. Используя алгоритмические процедуры "систем искусственного технологического интеллекта" [4] и приведенные выше типовые решения, можно целенаправленно синтезировать высокоэффективные технологические объекты для лезвийной, деформирующей и комбинированной обработки, функционирующие в режиме самоорганизации контактных процессов под конкретные производственные условия.

**Рис. 2. Деформирующий инструмент после обработки партии деталей из стали Ст3 при применении металлоплакирующих смазок**

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Григорьев С.Н.** Методы повышения стойкости режущего инструмента. М.: Машиностроение, 2011. 368 с.

2. **Осико В.В., Ломонова Е.Е.** Полифункциональные материалы на основе наноструктурированных кристаллов частично стабилизированного диоксида циркония // Вестник Российской академии наук. Т. 82. № 9. 2012. С. 790–800.

3. **Грубый С.В.** Теоретические исследования процесса изнашивания лезвийных инструментов // Вестник машиностроения. 2006. № 2. С. 44–50.

4. **Щедрин А.В., Ульянов В.В., Бекаев А.А. и др.** Трибология как фундаментальная основа системного проектирования конкурентоспособных технологических объектов // Ремонт, восстановление, модернизация. 2009. № 4. С. 15–20.

5. **Щедрин А.В., Гаркунов Д.Н., Мельников Э.Л.** Расширение возможностей комбинированного волочения инструментом с регулярной микрогеометрией путем применения металлоплакирующих присадок // Вестник машиностроения. 2011. № 4. С. 69–72.

6. **Гаврилов С.А., Щедрин А.В.** Совершенствование технологии применения металлоплакирующего кондиционера в методах комбинированной обработки // Вестник машиностроения. 2012. № 6. С. 75–78.

УДК 67.017

**В.А. Кузнецов, Т.Д. Тимофеева, Н.В. Хомякова**
*(Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ))*
*E-mail: vak@mami.ru*

# Повышение эффективности операций механообработки за счет модификации поверхностного слоя инструментов

*Рассмотрено взаимодействие обрабатывающего инструмента с деталью при различных видах механической обработки. Показано, что наиболее благоприятные условия обработки обеспечиваются при формировании на рабочих поверхностях режущих и деформирующих элементов регулярной микрогеометрии, нанесении на них износостойких покрытий. Приведены методика и алгоритм расчета характеристик покрытия, обеспечивающих наибольшую стойкость инструмента.*

***Ключевые слова:*** *инструмент, покрытия, механическая обработка, физико-механические характеристики, методика расчета.*

*The article considers the interaction of the machining tool with detail at the various types of mechanical processing. It is shown that the conditions most favourable treatment is provided at the formation of the working surfaces of cutting and distorting elements in a regular microgeometry applied on them wear resistant coatings. Method and algorithm of calculating characteristics of coatings achieve the best tool life were presented.*

***Keywords:*** *tool, coatings, machining, physical and mechanical characteristics, method of calculation.*

Вследствие шероховатости контактирующих поверхностей взаимодействие обрабатывающего инструмента с деталью происходит в отдельных точках их касания. Под действием нагрузки в точках контакта развиваются большие удельные давления, приводящие к внедрению неровностей рабочих поверхностей инструмента в обрабатываемую поверхность как более жестких тел в более мягкое контртело. Глубина внедрения неровностей зависит от применяемых режимов и характера микрорельефа рабочих поверхностей инструмента (высоты, формы, взаиморасположения микронеровностей). Так как характер микрорельефа рабочих поверхностей инструмента, изготовленных по типовой технологии с применением шлифовальных кругов и паст из синтетических алмазов, неоднороден, то при определенных режимах неодинаковые по высоте неровности будут внедряться на различную глубину.

В свою очередь, глубина внедрения определяет вид нарушения фрикционной связи: упругое оттеснение, пластическое оттеснение, микрорезание, а следовательно, работоспособность инструмента. При нормальной работе в зоне контакта инструмента с заготовкой имеет место упругое оттеснение, переходящее в пластические деформации. Недопустимы переходы от пластического оттеснения к микрорезанию и от пленочного износа к глубинному вырыванию, так как в этом случае резко снижаются стойкость инструмента и качество обработки. Кроме того, характер микрогеометрии рабочих поверхностей определяет фактическую площадь контакта инструмента с обрабатываемой деталью. Данный параметр необходим для расчета сил деформирования, контактных давлений, коэффициента трения, температуры в зоне обработки и т.д. При хаотичном характере микрорельефа рабочих поверхностей деформирующих элементов решение задач по определению глубины внедрения микронеровностей и фактической площади контакта инструмента с деталью трудновыполнимо.

Решение контактных задач в значительной степени упрощается при наличии регулярной микрогеометрии на рабочих поверхностях режущих и деформирующих элементов. Одним из методов, позволяющих формировать рельеф такого характера, является процесс выглаживания (вибровыглаживания). Рисунок микрорельефа зависит от характера взаимного перемещения инструмента и детали. Процесс нанесения винтовых канавок микрорельефа на деформирующие элементы протяжек и методика расчета фактической площади контакта инструмента с деталью приведены в статье [1].

При применении вибровыглаживания рисунок регулярного микрорельефа (РМР) может быть усложнен. Например, при вибрациях индентора в направлении подачи канавки рельефа будут иметь синусоидальный характер, а при вибрациях в двух взаимно перпендикулярных направлениях с определенными амплитудами или дополнительном вращении можно получить циклоиду.

При обработке отверстий смазочно-охлаждающая технологическая среда (СОТС), подаваемая в зону обработки, затекает в винтовые канавки РМР, нанесенного на рабочие поверхности инструмента, и задерживается в них до момента начала обработки.

Непосредственно во время обработки большие контактные давления приводят к выдавливанию из замкнутого объема винтовой канавки СОТС в зону обработки и созданию масляной пленки между инструментом и обрабатываемой деталью. Тем самым устраняется непосредственный контакт металла детали и инструмента, следовательно, повышается стойкость деформирующих элементов.

При нанесении на рабочие поверхности инструмента регулярного микрорельефа уменьшается опорная площадь поверхности и пропорционально увеличивается площадь, занятая масляными каналами. В процессе обработки СОТС, находящаяся в масляных каналах, за счет контактных давлений выдавливается на поверхность выступов микрорельефа. В результате этого поверхности инструмента и детали оказываются надежно разделенными слоем смазки, что практически полностью исключает явление адгезионного схватывания. Кроме этого, повышается стойкость инструмента за счет упрочнения рабочих поверхностей в результате вибровыглаживания. Так, результаты экспериментальных исследований показывают, что при нанесении на твердосплавный деформирующий элемент регулярного микрорельефа в виде винтовых канавок его стойкость против адгезионного схватывания при обработке стали 12ХН3А повышается в 2–3 раза, а стали 45 – в 1,5 раза. При обработке деталей из стали 18ХГТ инструментом из закаленной стали ШХ-15 с нанесенным на рабочие поверхности синусоидальным микрорельефом (рис. 1) взаимного схватывания материалов детали и инструмента не наблюдается до натягов 0,5...0,6 мм. Здесь следует отметить также, что применение выглаживания и вибровыглаживания для нанесения РМР на рабочие поверхности деформирующих элементов протяжек позволяет создать математическую модель для определения силы протягивания с учетом фактической, а не номинальной или среднестатистической площади контакта инструмента с деталью. Это, в свою очередь, дает возможность адекватно определять энергоемкость процесса и обоснованно выбирать мощность оборудования для реализации метода обработки. Кроме того, по величине усилия можно судить о стойкости инструмента, качестве обработанной поверхности и других параметрах процесса.

**Рис. 1. Деформирующий элемент с регулярным микрорельефом**

Кроме упрочнения в результате механического воздействия на рабочие поверхности инструмента целесообразно наносить различные износостойкие покрытия (твердосплавные, TiN, ZrN, HfN, Cr, керамику и их сочетания). Данные покрытия, наносимые различными методами (конденсация ионной бомбардировкой (КИБ), наплавка, детонационный и т.д.), позволяют не только увеличить прочность поверхностного слоя рабочей поверхности, но и надежно разделить контактирующие в процессе обработки поверхности детали и инструмента. Это дает возможность расширить номенклатуру инструментальных материалов за счет применения безвольфрамовых сталей с износостойкими покрытиями. Данные стали не могли быть применены для обработки в качестве материала инструмента из-за сходства своих физико-механических свойств со свойствами обрабатываемых металлов, что вызывало интенсивные диффузионные и адгезионные явления.

Явление адгезионного схватывания в условиях механической обработки определяется налипанием металла обрабатываемой детали на рабочие поверхности инструмента. Это приводит к потере инструментом работоспособности, а также к резкому увеличению усилий обработки и ухудшению качества поверхности: увеличению шероховатости, вырывам металла и т.д. Вследствие этого для снижения возможности адгезионного схватывания стараются обеспечить режим жидкостного трения между поверхностями детали и инструмента, разделяя их слоем смазки, а также при подборе материала инструмента выбирают материал, по физико-механическим характеристикам коренным образом отличающийся от обрабатываемого материала.

Как показывают эксперименты, проведенные для условий деформирующе-режущего протягивания отверстий и нарезания зубьев круговыми протяжками,

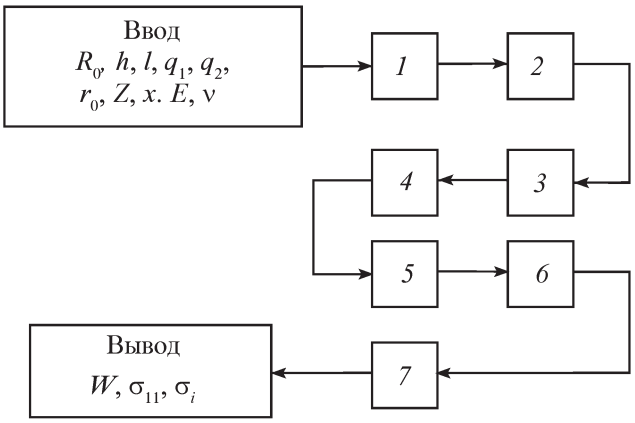



**Рис. 2. Алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния износостойкого покрытия без учета сил трения:**

$1-\alpha=\sqrt[4]{\frac{A}{4}}$; $2-b=\frac{q_2-q_1}{l}x+q_1$; $3-k=\frac{q_2-q_1}{l}$;

$4-D=\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$; $5-W(x)=\frac{b}{8\alpha^4 D}\{2-e^{-\alpha x}\cos\alpha x-e^{\alpha(x-l)}\times$

$\times\cos\alpha(x-l)\}+\frac{k}{16\alpha^5 D}\{e^{-\alpha x}[2\alpha x\cos\alpha x+\cos\alpha x-\sin\alpha x]-$

$-e^{\alpha(x-l)}[2\alpha x\cos\alpha(x-l+\cos\alpha(x-l)+\sin\alpha(x-l)\}$;

$6-\sigma_{11}=-\frac{E}{1-\nu^2}z\left\{\frac{q_2-q_1}{8\alpha^3 l D}[e^{-\alpha x}(\cos\alpha x+\sin\alpha x)]+e^{\alpha(x-l)}\times\right.$

$\times(\sin\alpha(x-l)-\cos\alpha(x-l)+2\alpha l\sin\alpha(x-l)+\frac{q_1}{4\alpha^2 D}\times$

$\left.\times[-e^{-\alpha x}\sin\alpha x+e^{\alpha(x-l)}\sin\alpha(x-l)]\right\}$; $7-\sigma_i=\frac{1}{\sqrt{2}}\times$

$\times\sqrt{(1+\nu)^2\sigma_{11}^2+\frac{2E(1+\nu)}{R_0}W\sigma_{11}+\left(\frac{EW}{R_0}\right)^2}$

интенсивный процесс адгезии начинается при нарушении целостности покрытия, т.е. при его местном разрушении. На этот процесс влияют такие факторы, как наличие в поверхностном слое детали твердых включений (окалины, карбидов и др.), геометрия инструмента, физико-механические свойства материалов покрытия и самого инструмента, контактные давления в зоне обработки и т.д. Учитывая изложенное, необходимо решить задачу определения деформаций и напряжений, возникающих в поверхностных слоях инструмента, имеющего износостойкое покрытие, для прогнозирования его прочности. Поскольку рабочие поверхности инструмента могут иметь различную форму, данная задача была решена применительно к цилиндрическим, призматическим и коническим с небольшими углами конуса инструментам. Так как инструмент в основном испытывает упругие деформации, для решения задачи были применены основные положения теории упругости.

Для призматических инструментов в качестве основы модели была принята пластина на упругом основании, для цилиндрического и конического – оболочка с наполнителем. На основании созданных математических моделей были разработаны алгоритмы (рис. 2 и 3) и программы расчета напряженно-деформированного состояния износостойких покрытий.

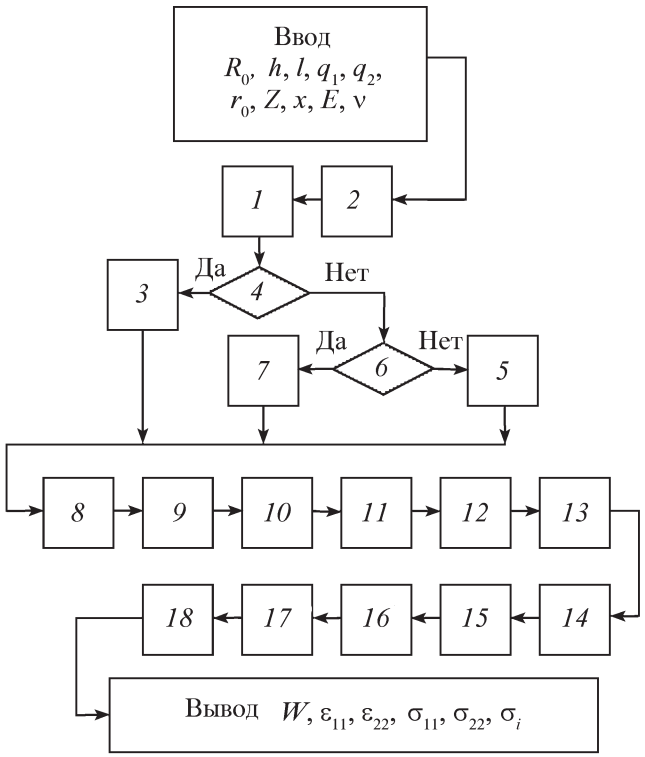



**Рис. 3. Алгоритм расчета напряженно-деформированного состояния износостойкого покрытия с учетом сил трения:**

$1-D=\frac{Eh^3}{12(1-\nu^2)}$; $2-k=\frac{q_2-q_1}{l_2-l_1}$; $3-\tilde{q}_1=P_1$; $4-0<x<l_1$;

$5-l_2<x<l_1$; $\tilde{q}=P_1$; $6-l_1<x<l_2$; $7-\tilde{q}=P_1-P_2$; $8-$

$q_n(x)=\frac{q_2-q_1}{l}x-q_1$; $9-\alpha=\sqrt{\frac{12(1-\nu^2)}{4h^2R_0^2}+\frac{a}{4D}}$; $10-$

$W=\frac{q_n(x)}{8\alpha^4 D}\times\{2-e^{-\alpha x}\cos\alpha x-e^{-\alpha(x-l)}\cos\alpha(x-l)\}+\frac{k}{16\alpha^5 D}\times$

$\times\{e^{-\alpha x}(2\alpha x\cos\alpha x-\sin\alpha x+\cos\alpha x)+e^{-\alpha(x-l)}\times$

$\times(2\alpha(x-l)\cos\alpha(x-l)-\sin\alpha(x-l)-\cos\alpha(x-l))\}-$

$-\frac{\nu x}{4R_0 D\alpha^4}(\rho gh-P_2)$; $11-T_1=\int_0^l\tilde{q}_1\,dx$; $12-\chi=\frac{d^2W}{dx^2}$;

$13-\varepsilon_2=-\frac{W}{R_0}$; $14-\varepsilon_1=\frac{T_1h^2}{12D}-\nu\varepsilon_2$; $15-e_{22}=\varepsilon_2$;

$16-e_{11}=\varepsilon_1-z\chi$; $17-\sigma_{22}=\frac{E}{1-\nu^2}(e_{22}+\nu e_{11})$; $18-$

$\sigma_{11}=\frac{E}{1-\nu^2}(e_{11}+\nu e_{22})$

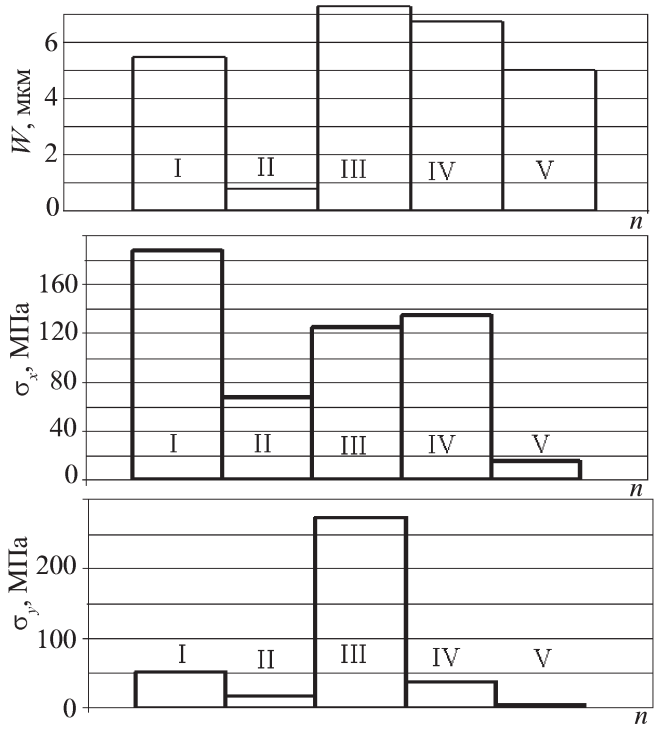



**Рис. 4. Результаты моделирования нагружения резцов круговых подтяжек:**
I – T5K10+TiN; II – T5K10+ZrN; III – P6M5+T5K10; IV – P6M5+TiN; V – P6M5+ZrN

В дальнейшем были проведены проверка адекватности математических моделей и моделирование нагружения резцов круговых протяжек из различных инструментальных материалов с различными износостойкими покрытиями. Результаты моделирования представлены на рис. 4. В подрисуночной подписи первым указан материал инструмента, затем – наносимое покрытие. Высота столбцов диаграмм указывает значения прогиба и напряжений, возникающих в поверхностном слое инструмента с нанесенным покрытием. Рациональным сочетанием "инструмент–покрытие" является сочетание, вызывающее минимальные внутренние напряжения.

Таким образом, разработанная методика позволяет на этапах проектирования инструмента прогнозировать значения прогиба и напряжений в целях определения рационального сочетания инструментального материала и материала покрытия.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. **Кузнецов В.А., Лобанов А.С., Простецков К.В.** Повышение эффективности протягивания за счет применения деформирующих элементов с регулярным микрорельефом // Проблема эксплуатации инструмента в металлообрабатывающей промышленности: Материалы семинара. М., Общество "Знание", 1992. С. 12–18.

УДК 621.787.4

**А.В. Смирнов** *(Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ))*
*E-mail: smirnoff-andrey2009@yandex.ru*

# Влияние способа установки сменной многогранной пластины на силу, контактное давление и цикличность нагружения при обработке выглаживанием

*Описаны теоретические и экспериментальные исследования влияния способа установки инструмента при выглаживании на динамические параметры процесса отделочно-упрочняющей обработки. В качестве деформирующего инструмента рассматривались токарные пластины стандартной геометрии (SNMG).*

***Ключевые слова:*** *выглаживание, область контакта, сила выглаживания, контактное давление, цикличность нагружения, способ установки инструмента.*

*The article describes the theoretical and experimental studies of the effect of the method of installation tool during processing of burnishing on dynamic parameters of the process of finishing-strengthening processing. As deforming tool considered turning inserts standard geometry (SNMG).*

***Keywords:*** *burnishing, contact area, the power of burnishing, contact pressure, cyclic loading, method of installation tool.*

Способ установки инструмента при обработке выглаживанием, а именно углы установки сменной многогранной пластины (СМП) и заданный натяг (для выглаживания с жестким закреплением инструмента), оказывает значительное влияние на геометрические параметры качества обработанных деталей.

В статье рассматриваются схемы установки СМП, в которых пластина поворачивается вокруг оси *OZ* на

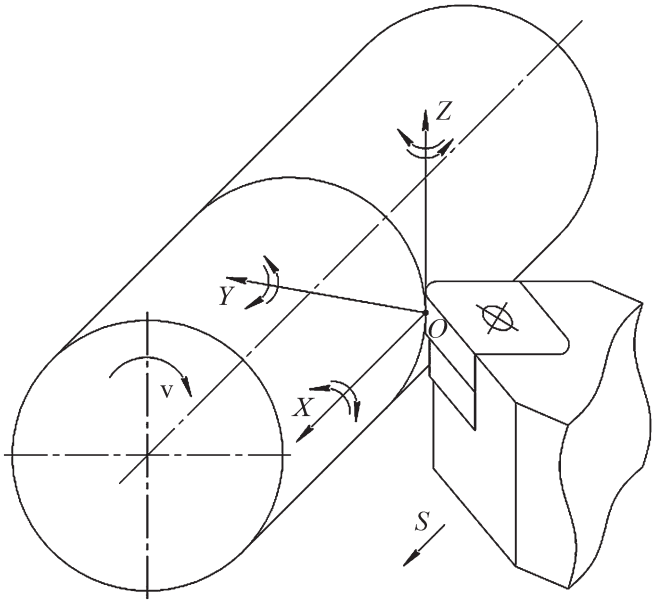



**Рис. 1. Схема обработки выглаживанием с применением СМП**

угол φ и (или) вокруг оси *OY* на угол ψ (рис. 1). Угол поворота считается условно положительным при повороте СМП против движения подачи инструмента, и условно отрицательным при повороте в направлении, совпадающем с направлением движения подачи инструмента [1].

Способ установки СМП определяет геометрические параметры области контакта инструмента и детали. Важность таких геометрических параметров контактной области, как площадь, длина и ширина, была обоснована в работах многих исследователей метода обработки выглаживанием. В частности, в работе [2] были установлены определенные закономерности влияния способа установки СМП на площадь и конфигурацию контактной области и проведены экспериментальные исследования зависимостей качества обработанных выглаживанием деталей от рассматриваемых статических характеристик.

Но для корректного прогнозирования качества обработанных поверхностей необходимо прибегнуть к параметрическому моделированию процесса выглаживания. Для этого необходимо разработать математическую модель, которая будет описывать количественные отношения ключевых параметров процесса обработки выглаживанием с применением СМП и их влияние на достигаемые геометрические параметры обработанной поверхности. В качестве параметров в данной работе рассматриваются:

*а*) статические характеристики: углы установки СМП, заданный натяг (для "жесткого" выглаживания);

*б*) геометрические параметры контактной области: площадь, длина и ширина контактной области – определяются параметрами, указанными в п. *а*;

*в*) динамические характеристики: сила, контактное давление, цикличность нагружения – зависят от параметров, указанных в п. *б*;

*г*) геометрические параметры качества: среднее арифметическое отклонение профиля *Ra*, относительная опорная длина профиля $t_p$, средний шаг неровностей профиля *Sm*, средний шаг местных выступов профиля *S*, коэффициент улучшения шероховатости $K = Ra_{\text{исх}} / Ra$.

При этом необходимо учесть тот факт, что для схемы с упругим закреплением инструмента сила выглаживания *P* будет являться технологическим режимом обработки наряду с углами установки СМП, а также скоростью выглаживания и подачей инструмента.

Математическая модель, описывающая зависимости статических, динамических, геометрических параметров и их влияние на достигаемые геометрические параметры качества процесса обработки выглаживанием, неудобна для практического использования в производственном процессе. Поэтому необходимо также решить обратную задачу – разработать методику расчета и выбора технологических режимов (заданного натяга *i* или силы выглаживания *P*) и способа установки инструмента в зависимости от требуемых геометрических параметров качества обработанной поверхности (рис. 2).

Для выявления зависимостей площади и ширины контактной области от схемы установки инструмента в данной работе был использован метод В.М. Торбило [3], который состоит в определении площади контактной области как суммы площадей пластического и упругого контактов:

$$F = K_F \left[ \frac{P}{\text{HV}} + 2{,}32 \left( \frac{1-\mu}{E} Pd \right)^{2/3} \right], \qquad (1)$$

где *F* – полная площадь контакта; *P* – сила выглаживания; *d* – диаметр заготовки; HV – твердость материала заготовки; *E*, μ – модуль Юнга и коэффициент Пуассона обрабатываемого материала соответственно; $K_F$ – коэффициент, учитывающий соотношение площадей упругого и пластического контактов (для сырых сталей $K_F = 0{,}75$, для закаленных $K_F = 1$).

Площадь пластического контакта $F_{\text{п}}$ рассчитывается по формуле Ф.П. Боудена и Д. Тейбора [4]

$$F_{\text{п}} = \frac{P}{\text{HV}}. \qquad (2)$$

Площадь пластического контакта вычислялась при помощи трехмерного твердотельного моделиро-

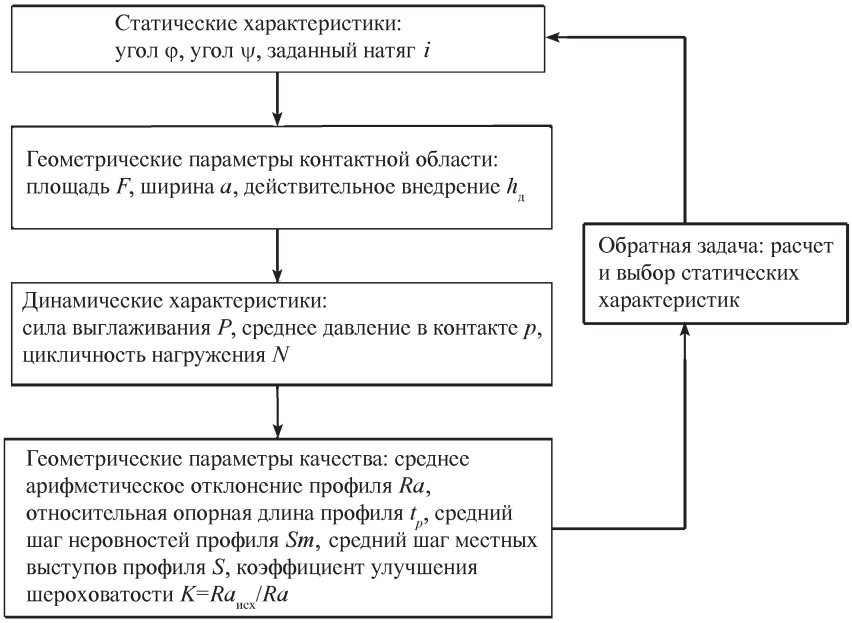



**Рис. 2. Структурная схема исследования взаимного влияния параметров процесса обработки выглаживанием с использованием в качестве инструмента СМП**

вания в программе "Компас 3D" [5]. Исходными данными послужили геометрия СМП, диаметр заготовки, углы установки инструмента φ и ψ, действительное внедрение СМП в металл заготовки $h_д$.

Для определения действительного внедрения СМП в металл заготовки $h_д$ и закономерности его изменения при изменении способа установки инструмента был проведен ряд экспериментов, в которых процесс выглаживания резко прерывался при установившемся режиме обработки. В результате появилась возможность изучить профиль области пластического контакта (очаг деформации). Запись профилограмм очага деформации осуществлялась на профилографе-профилометре Mahr MarSurf M300. При измерении записанных профилограмм устанавливалось пластическое внедрение $h_п$. В качестве образцов были использованы валы из стали 45 диаметром от 70 до 85 мм.

Поворот СМП вокруг вертикальной оси *OZ* на угол φ значительно (в 2–3 раза) увеличивает действительное внедрение $h_д$ за счет перераспределения сил, возникающих в процессе выглаживания (рис. 3). При повороте на угол –φ (в направлении движения продольной подачи инструмента) действительное внедрение увеличивается на 10...15 % больше, чем при повороте в условно положительном направлении. Рост действительного внедрения приводит к пропорциональному увеличению площади *F* и ширины области контакта *a*. Причем форма пятна контакта остается практически неизменной при повороте СМП на угол φ. Оно представляет собой отпечаток эллиптической формы с большей полуосью, сориентированной вдоль вектора скорости главного движения выглаживания.

Поворот СМП вокруг горизонтальной оси *OY* на угол ψ не приводит к сколько-нибудь значительному изменению действительного внедрения, но за счет поворота эллиптической области контакта в направ-

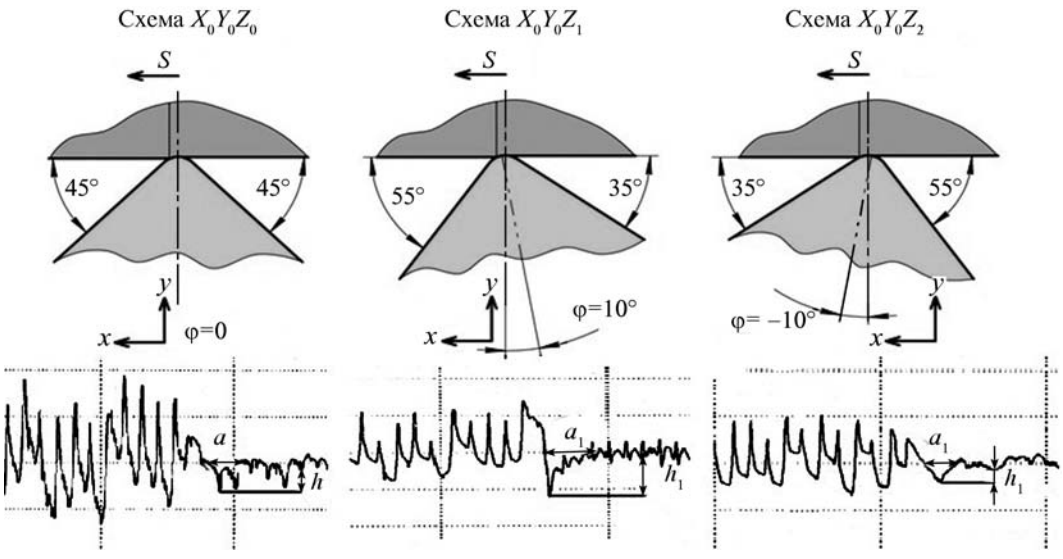



**Рис. 3. Профилограммы очагов деформации при повороте СМП вокруг вертикальной оси *OZ***

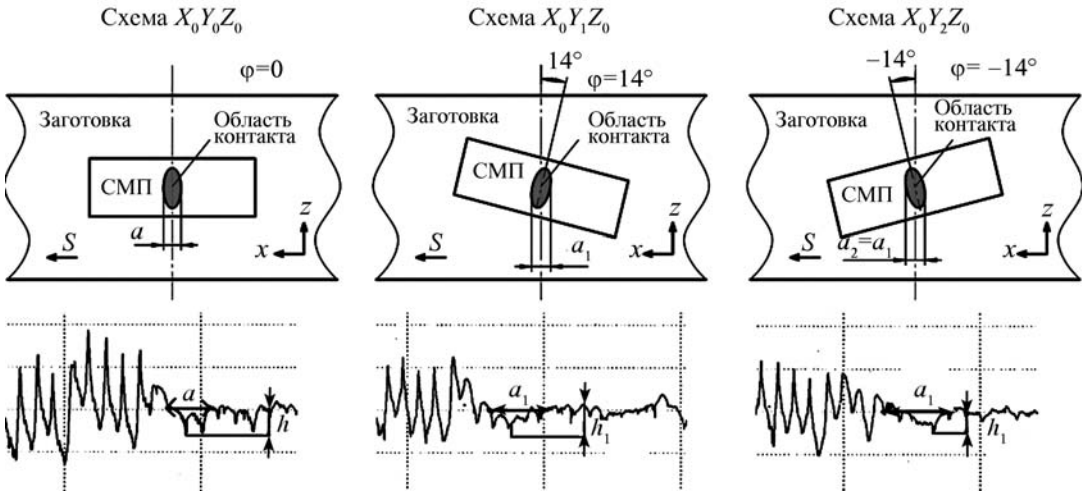



**Рис. 4. Профилограммы очагов деформации при повороте СМП вокруг горизонтальной оси *OY***

лении оси заготовки происходит увеличение этой площади и ширины площадки контакта *a* (рис. 4).

После нахождения значений действительного внедрения инструмента в металл заготовки, соответствующих рассматриваемым схемам установки СМП, были вычислены значения площадей пластического контакта посредством моделирования в "Компас 3D". Пользуясь формулой Ф.П. Боудена и Д. Тейбора, основанной на выражении силы через площадь пластического контакта ($F = P / \mathrm{HV}$), была рассчитана сила выглаживания. Зная значения силы выглаживания, соответствующие рассматриваемым схемам установки инструмента, можно вычислить значения полной площади контакта СМП с заготовкой, среднего давления в контакте и цикличности нагружения.

Для вычисления полной площади контакта (т.е. пластического контакта + упругого контакта), среднего давления на площадке контакта и цикличности нагружения была использована методика В.М. Торбило [3]. После выполнения расчетов, построения графических зависимостей и проведения регрессионного анализа были впервые получены аналитические и графические зависимости полной площади контакта (рис. 5) и ширины области контакта от способа установки инструмента, а также зависимости динамических характеристик процесса, таких как сила выглаживания, среднее давление в контакте, цикличность нагружения, от углов установки инструмента.

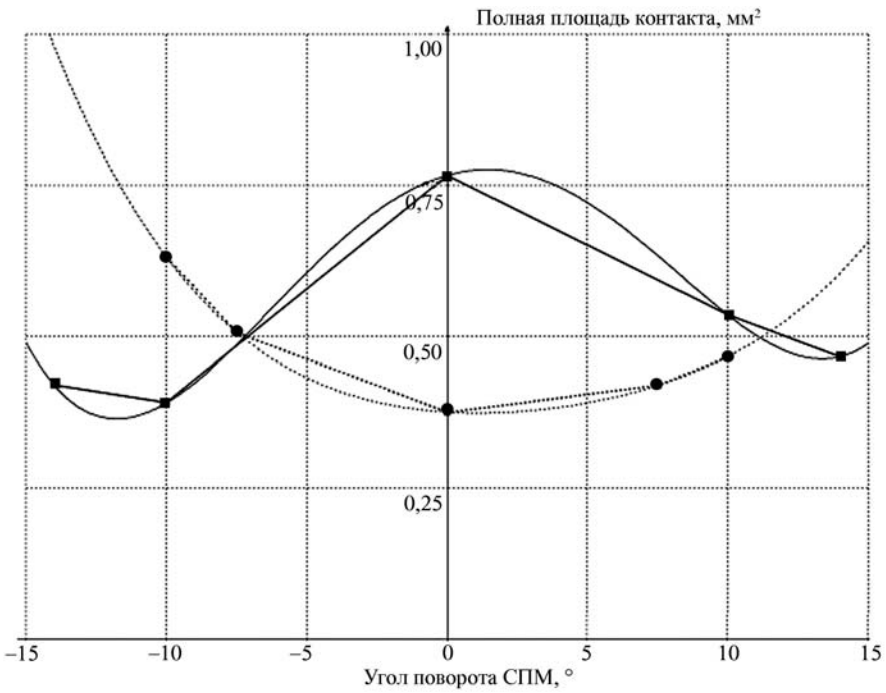



**Рис. 5. Зависимость полной площади контакта от способа установки СМП:**
■ – φ = 10°, *i* = 40 мкм (эксперимент); ● – ψ = 14°, *i* = 40 мкм (эксперимент); —— ψ(φ = 10°) (расчет); – – – φ(ψ = 14°) (расчет)

Для проверки адекватности методики расчета полной площади контакта были проведены экспериментальные замеры: выполнена обработка выглаживанием пластинами с износостойким покрытием, которое стиралось после одного прохода, и замер полученной области на контактно-оптической ко-

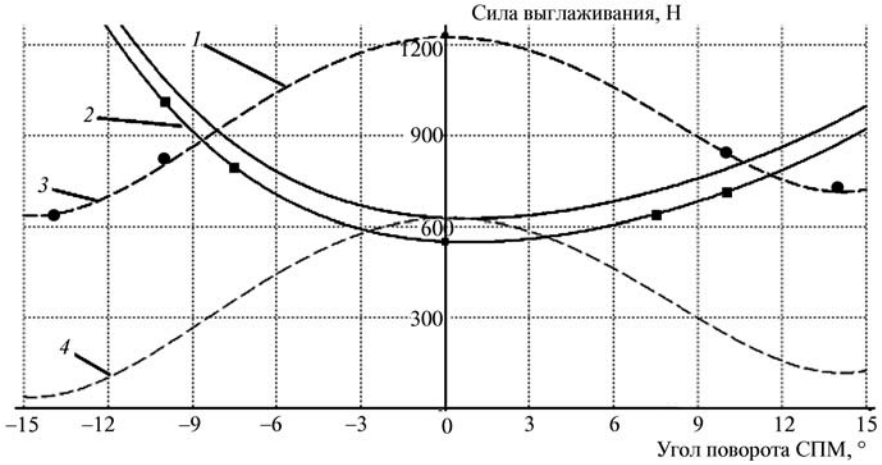



**Рис. 6. Зависимость силы выглаживания от углов установки СМП:**
● – ψ (φ = 10°, *i* = 40 мкм; эксперимент); ■ – φ (ψ = 14°, *i* = 40 мкм; эксперимент); *1* – φ (ψ = 0, *i* = 40 мкм; расчет); *2* – φ (ψ = 14°, *i* = 40 мкм; расчет); *3* – ψ (φ = 10°, *i* = 40 мкм; расчет); *4* – ψ (φ = 0, *i* = 40 мкм; расчет)

ординатно-измерительной машине DKM 1-300DP. Результаты измерений показали расхождение с расчетными данными в пределах 10 %.

Сила выглаживания *P* и среднее давление в контакте *p* вычислялись следующим образом:

$$P = F_{\text{п}}\,\text{HV}, \quad p = \frac{P}{F}, \tag{3}$$

где $F_{\text{п}}$ – площадь пластического контакта; *F* – полная площадь контакта; HV – твердость материала обрабатываемой заготовки.

Сила выглаживания интенсивно изменяется при смене схемы установки СМП (рис. 6). Наибольших значений эта сила достигает при установке пластины с поворотом вокруг вертикальной оси на угол –φ. Вместе с тем, пропорционально растет и площадь контакта. Поэтому зависимость среднего давления в контакте от угла установки φ имеет схожий (параболический) характер (рис. 7), только несколько более симметричный относительно нулевого положения. Зависимости силы выглаживания и среднего давления от величины и направления угла поворота ψ (вокруг горизонтальной оси *OY*) имеют противоположный характер – с увеличением угла ψ оба динамических параметра уменьшаются, причем сила выглаживания падает весьма значительно (примерно в восемь раз, с 600 до 50...90 Н), но из-за пропорционального уменьшения площади области контакта среднее давление остается практически неизменным (1500... 1590 Па).

Цикличность нагружения *N* рассчитывалась по формуле

$$N = \frac{a}{s}, \tag{4}$$

где *a* – ширина контактной области; *s* – подача инструмента.

Цикличность нагружения (рассчитанная для подачи 0,08 мм/об) увеличивается в интервале 5...10 раз при повороте СМП вокруг вертикальной и горизонтальной осей на углы φ и ψ соответственно (рис. 8). В первом случае это связано с увеличением ширины области контакта за счет роста действительного внедрения, а во втором – с ростом ширины области контакта при повороте пластины вдоль оси заготовки.

Увеличение цикличности нагружения при увеличении углов поворота СМП говорит о том, что возможно назначить бóльшую подачу инструмента, оставаясь в интервале значений цикличности нагружения, достаточных для стабильного протекания процесса отделочно-упрочняющей обработки, что

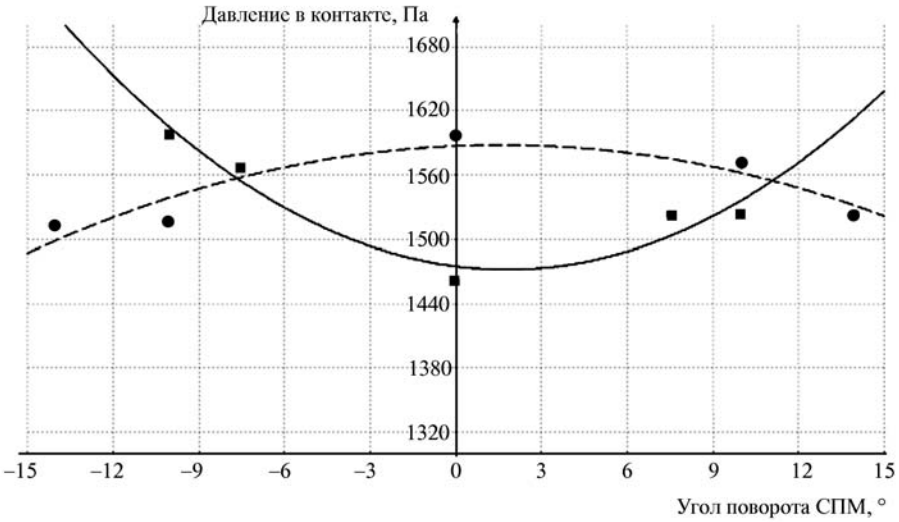



**Рис. 7. Зависимость давления в контакте от углов установки СМП:**
● – ψ (φ = 10°, *i* = 40 мкм; эксперимент); ■ – φ (ψ = 14°, *i* = 40 мкм; эксперимент); —— φ (ψ = 14°, *i* = 40 мкм; расчет); – – – ψ (φ = 10°, *i* = 40 мкм; расчет)

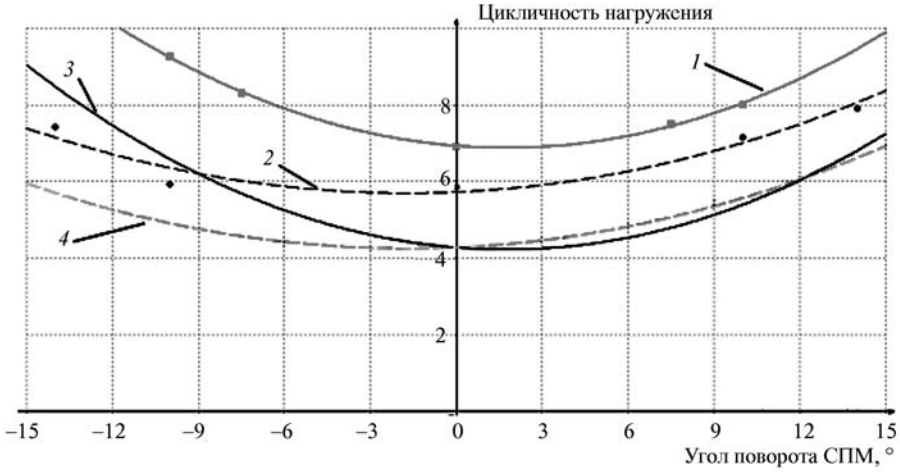



**Рис. 8. Зависимость цикличности нагружения от углов установки СМП:**
● – ψ (φ = 10°, *i* = 40 мкм; эксперимент); ■ – φ (ψ = 14°, *i* = 40 мкм; эксперимент); *1* – φ (ψ = 14°, *i* = 40 мкм; расчет); *2* – ψ (φ = 10°, *i* = 40 мкм; расчет); *3* – φ (ψ = 0, *i* = 40 мкм; расчет); *4* – ψ (φ = 0, *i* = 40 мкм; расчет)

позволяет увеличить производительность выглаживания при сохранении требуемого качества обработанной поверхности.

На основе результатов проведенных исследований можно сделать вывод о том, что выявленные зависимости конфигурации и площади области контакта СМП с заготовкой от величины и направления изменения углов установки инструмента, заданного технологического натяга и диаметра заготовки позволили функционально связать способ установки пластины с силовыми и динамическими параметрами процесса поверхностного пластического деформирования и использовать данные зависимости в практических расчетах режимов отделочно-упрочняющей обработки выглаживанием.

**БИБЛИОГРФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. **Кузнецов В.А., Шеставин П.В., Смирнов А.В., Сазонов Д.А.** Выглаживание деталей многогранными неперетачиваемыми пластинами // Автомобильная промышленность. 2010. № 10. С. 24.

2. **Зубков Э.И.** Повышение эффективности выглаживания наружных цилиндрических поверхностей инструментом из минералокерамики: Дис. ... канд. техн. наук: 05.02.08. М., 1992.

3. **Торбило В.М.** Основы обеспечения качества и производительности при отделочно-упрочняющей обработке выглаживанием: Дис. ... д-ра техн. наук; 05.02.08. Пермь, 1986. 385 с.

4. **Боуден Ф.П., Тейбор Д.** Трение и смазка твердых тел. М.: Машиностроение, 1968. 543 с.

5. **Кузнецов В.А., Сазонов Д.А., Смирнов А.В.** Моделирование контакта инструмента с деталью при обработке выглаживанием в программной среде "Компас 3D" // Известия Московского государственного технического университета МАМИ. 2011. № 2. С. 144–149.

УДК: 621.98.044; 621.9.07

**А.А. Черепахин, В.М. Виноградов** *(Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ))*
*E-mail: tkm1410@yandex.ru*

# Особенности кинематики процесса холодного накатывания и выбор наиболее рациональной схемы его реализации

*Рассмотрены схемы холодного чистового накатывания среднемодульных цилиндрических зубчатых колес. Приведена методика выбора схемы накатывания на основе анализа точности обработки.*
***Ключевые слова:*** *модуль, зубчатое колесо, накатывание, точность, схема обработки.*

*In a paper circuits of a cold fair rolling of cylindrical tooth gears of the average module are considered. The technique of a choice of the circuit of a rolling on the basis of the assaying of exactitude of handling is reduced.*
***Keywords:*** *the module, tooth gear, rolling, exactitude, the handling circuit.*

Холодное накатывание зубьев – это процесс окончательной обработки холодным поверхностным пластическим деформированием зубчатых колес, предварительно обработанных фрезерованием, протягиванием или долблением, с помощью вращающихся накатников.

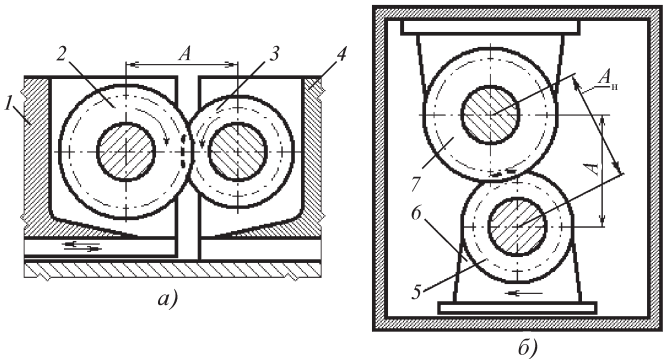



**Рис. 1. Схемы накатывания одним накатником:**
*а* – с радиальным движением подачи; *б* – с тангенциальным движением подачи; *1* – подвижная накатная бабка; *2*, *7* – накатник; *3*, *5* – заготовка; *4* – неподвижная бабка изделия; *6* – подвижная бабка изделия; $A_н$ – начальное межцентровое расстояние; *A* – заданное межцентровое расстояние

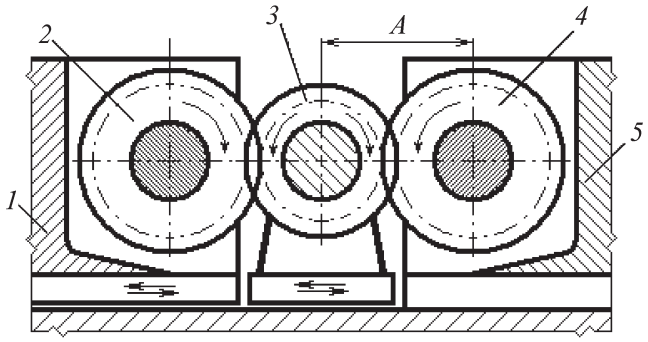



**Рис. 2. Схема накатывания двумя накатниками:**
*1*, *5* – подвижная и неподвижная накатные бабки соответственно; *2*, *4* – накатник; *3* – заготовка; *A* – заданное межцентровое расстояние

Цель обработки – значительное улучшение точности зубчатых колес, а также качества обработанной поверхности боковых сторон зубьев.

Накатывание выполняется на зубоприкатных станках при параллельных осях инструмента и заготовки. Инструмент (далее – накатник) – зубчатое колесо из инструментальной (быстрорежущей) стали.

Схемы накатывания одним накатником показаны на рис. 1. Накатывание одним накатником осуществляется по двум схемам: с радиальным или тангенциальным движением подачи.

При накатывании с радиальным движением подачи (см. рис. 1, *а*) подвижная накатная бабка *1*, перемещаясь, вводит вращающийся накатник *2* в зацепление с заготовкой *3*, установленной на оправке неподвижной бабки изделия *4*. При уменьшении расстояния между осями заготовки и накатника происходит пластическое деформирование рабочих поверхностей зуба заготовки. По достижении заданного размера *A* прекращается перемещение накатной бабки, и она возвращается в исходное положение.

При накатывании с тангенциальным движением подачи (см. рис. 1, *б*) заготовка *5* устанавливается на оправке подвижной бабки изделия *6* на расстоянии $A_н$ от оси накатника *7*. Вращательное главное движение придается накатнику *7*.

Накатывание двумя накатниками осуществляется по оппозитной схеме (рис. 2). При радиальном перемещении подвижной накатной бабки *1* вращающийся накатник *2* входит в зацепление с вращающейся заготовкой *3*, а затем вместе с ней продолжает перемещаться к синхронно вращающемуся накатнику *4*, установленному на шпинделе неподвижной накатной бабки *5*. При достижении заданного межосевого расстояния *A* радиальное перемещение подвижной накатной бабки прекращается, и она возвращается в исходное положение.

Накатывание тремя накатниками осуществляется по симметричной схеме (рис. 3). Предварительно нарезанное зубчатое колесо устанавливается в станке в центрах или на оправке. Обработка ведется при взаимном вращении заготовки *4* и накатников *1*. При радиальном перемещении шпинделей *3* накатной головки постепенно сокращается расстояние между шпинделями *2* и *3*. При достижении заданного межосевого расстояния *A* радиальное перемещение шпинделя *3* прекращается. Достоинствами данной схемы являются самоцентрирование заготовки и уменьшенный прогиб шпинделя заготовки при калибровании.

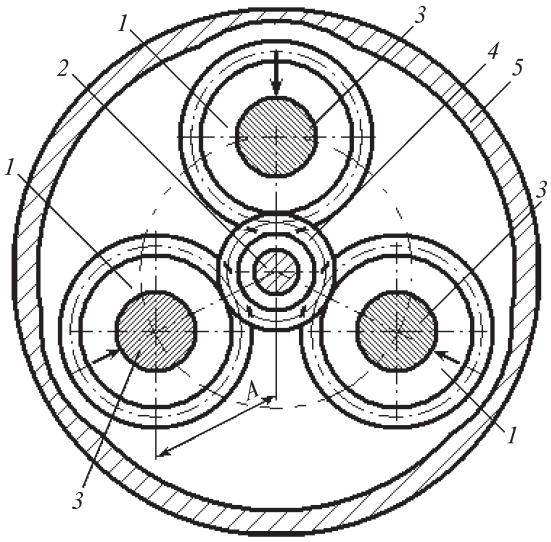



**Рис. 3. Схема накатывания тремя накатниками:**
*1* – накатник; *2* – шпиндель изделия; *3* – шпиндель накатника; *4* – заготовка; *5* – накатная головка; *A* – заданное межцентровое расстояние

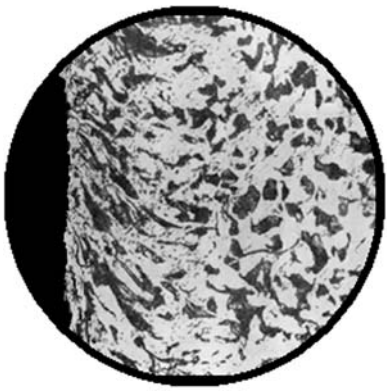


**Рис. 4. Структура материала после холодного накатывания**

Применение профильного накатывания при окончательной обработке зубьев шестерен на заводах Ford в США показало хорошие результаты в отношении качества поверхностного слоя зубьев обработанных шестерен. При пластическом деформировании в процессе обработки наблюдаются уплотнение поверхностного слоя (до 1 мм) и повышение твердости поверхности на 5...10 % по сравнению с твердостью исходного материала. Это ведет к увеличению износостойкости зубьев примерно на 25 %. Структура металла после холодного накатывания показана на рис. 4.

Время обработки предварительно нарезанных зубьев колеса профильными накатниками составляет 2...3 с. Это значительно меньше машинного времени шевингования и тем более шлифования. Шероховатость боковых сторон зубьев *Ra* составляет от 0,5 до 1,0 мкм. Точность обработки зубьев профильными накатниками несколько выше, чем при шевинговании. Сопоставление отдельных параметров точности обработки шевингованием и холодным накатыванием после фрезерования червячной фрезой представлено на рис. 5.

Как показывает опыт применения холодного накатывания зубьев на зарубежных и отечественных автозаводах, наибольшее распространение при обработке цилиндрических зубчатых колес средних модулей получили три схемы: накатывание одним накатником по методу "Mono roll", двумя накатниками по методу "Ford" и тремя накатниками с продольной подачей заготовки. Таким образом, две схемы обработки основаны на использовании поперечной подачи инструмента и одна схема – на использовании продольной подачи заготовки.

В связи с этим представляет интерес обоснованный выбор наиболее рациональной схемы холодного накатывания зубьев на основе анализа кинематики самого процесса накатывания.

Так как в процессе холодного накатывания зубья накатника при поперечной подаче инструмента совершают одновременно вращательное и прямолинейное движения, траектория следа накатника на заготовке представляет собой спираль, уравнение которой выражается формулой

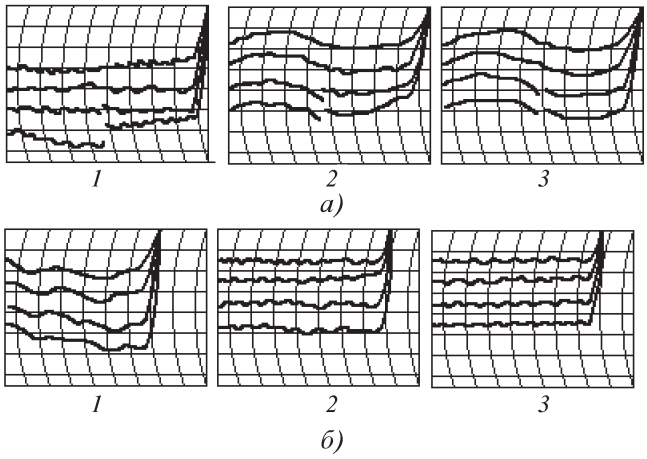



**Рис. 5. Сопоставление параметров точности при различных методах зубообработки:**
*а* – направление зуба; *б* – отклонение профиля; *1* – после фрезерования червячной фрезой; *2* – после шевингования; *3* – после холодного накатывания

$$\rho = r_з - \frac{S_п \varphi}{2\pi},$$

где ρ – переменный радиус перемещения точки $A_\varphi$ (рис. 6) следа накатника; φ – переменный угол, определяющий положение точки $A_\varphi$; $r_з$ – исходный радиус спирали, равный радиусу заготовки; $S_п$ – шаг спирали, численно равный скорости поперечного движения подачи на оборот.

Спиральная траектория следа накатника обусловливает отклонение положения формируемого зуба заготовки от теоретического. Это отклонение выражается "завалом" зуба в сторону, противоположную направлению вращения заготовки. Величина "завала" зуба и связанные с ним погрешности определяются углом $Q$, который представляет собой угол между осями симметрии зуба в его теоретическом и действительном положениях или между нормалями к спирали и окружности заготовки,

$$Q = \operatorname{arctg} \frac{S_п}{2\pi r_з - S_п \varphi}.$$

Наибольшее значение угла "завала" зуба $Q_{max}$ достигается в конце рабочей подачи накатника, когда формируется диаметр впадин $D_к$ зубчатого венца. При этом увеличение скорости поперечного движе-

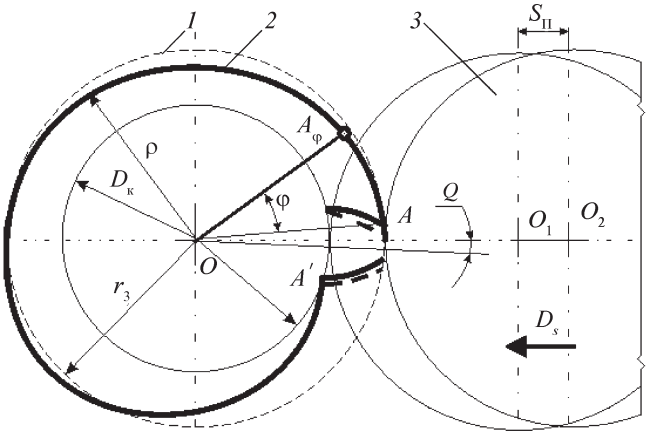



**Рис. 6. Определение угла "завала" зуба *Q* при поперечном движении подачи:**
*1* – заготовка; *2* – спиральный след накатника; *3* – накатник; $D_к$ – диаметр впадин зубчатого венца; $A$, $A_φ$, $A'$ – начальная, переменная и конечная точки следа соответственно; ρ – переменный радиус перемещения точки следа накатника; φ – переменный угол, определяющий положение точки $A_φ$

ния подачи приводит к увеличению "завала" зуба, а следовательно, и связанных с ним погрешностей обработки.

При холодном калибровании зубьев тремя накатниками с продольным движением подачи заготовки зубу накатника кроме осевого движения придается относительное радиальное (поперечное) перемещение (за счет заборного конуса) со скоростью приведенной поперечной подачи $S_{п.п}$,

$$S_{п.п} = S_{пр} \operatorname{tg} \beta,$$

где $S_{п.п}$ – приведенная поперечная подача; $S_{пр}$ – скорость движения продольной подачи; β – угол заборного конуса накатника. В реальных условиях угол заборного конуса накатника изменяется в пределах от 5 до 15°, поэтому соотношение для скоростей поперечной и продольной подачи примет вид $S_{п.п} = (0{,}09 \ldots 0{,}27)\, S_{пр}$.

При профильном накатывании величины $S_{п.п}$ и $S_{пр}$ соизмеримы, поэтому $S_{п.п} = S_П$.

Отсюда следует, что при профильном накатывании с поперечным движением накатывания угол "завала" зуба будет больше, чем при накатывании с продольным движением подачи. Кроме того, при холодном накатывании зубьев с поперечным движением подачи возникают значительные радиальные усилия, что сопровождается большими деформациями (отжатиями) в технологической системе "станок – приспособление – инструмент – заготовка", а время накатывания значительно меньше, чем при накатывании с продольным движением подачи.

Проведенный анализ позволил сделать следующие выводы. Холодное накатывание с продольной подачей обеспечивает более высокую точность обработки, чем с поперечной подачей. С точки зрения простоты конструктивного решения и повышения жесткости технологической системы наиболее рациональными схемами холодного накатывания зубьев среднемодульных колес следует считать накатывание тремя накатниками с продольной подачей заготовки и холодное накатывание двумя накатниками по методу "Ford".

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. **Лапин В.В., Писаревский М.И. и др.** Накатывание резьб, червяков, шлицев и зубьев. Л.: Машиностроение, 1986. 223 с.

2. **Виноградов В.М., Черепахин А.А., Буянов А.С.** Обоснование выбора наиболее рациональной схемы профильного накатывания // Заготовительные производства в машиностроении. 2010. № 6. С. 36–37.

3. **Буянов А.С., Черепахин А.А.** Особенности холодного чистового калибрования зубчатых колес автомобильных трансмиссий // Автомобильная промышленность. 2011. № 8. С. 32–33.

4. **Kahnel H.** Wirttschaftliche Kaltumfomungmigmittels Roto-Flo Verfahren // Techn.-Rept, Spec., 1982. № 9A. P. 56–58.

УДК 67.017

**А.А. Верещака** *(МГТУ "СТАНКИН", Университет машиностроения);*
**А.С. Верещака** *(МГТУ "СТАНКИН");*
**А.Ю. Попов** *(Московский государственный университет путей сообщения "МИИТ")*
*E-mail: ecotech@rambler.ru*

# Разработка и исследование наноструктурированных многослойно-композиционных покрытий твердосплавных инструментов, предназначенных для тяжелых условий обработки

*Рассмотрена возможность повышения работоспособности твердосплавных пластин формы BNMX и LNMX (ISO) из твердого сплава T14K8 (ISOP30) при высокопроизводительной репрофилирующей восстановительной обработке железнодорожных колесных пар. Высокая эффективность обработки достигнута при использовании твердосплавных пластин с наноструктурированными многослойно-композиционными покрытиями на основе трехслойной системы Ti–TiN–TiAlCrN, формируемой при использовании процесса фильтруемого катодно-вакуумно-дугового осаждения на установке ВИТ-2. Изучен механизм изнашивания твердосплавных пластин BNMX (ISO) с разработанными покрытиями, который выявил отсутствие типичных для условий тяжелой обработки с* $v = 40...80$ *м/мин;* $S = 0{,}8...1{,}2$ *мм/об;* $t = 4{,}0...8{,}0$ *мм сколов и макроразрушений режущих кромок пластин. Стойкость пластин с разработанными покрытиями до двух раз превышала стойкость пластин с коммерческими покрытиями стандартных типов.*

***Ключевые слова:*** *наноструктурированные многослойно-композиционные покрытия, фильтруемое катодно-вакуумно-дуговое осаждение, тяжелые условия резания, режущий инструмент.*

*The possibility of increasing the health of carbide inserts form BNMX and LNMX (ISO) from a firm alloy T14K8 (ISOP30) high-profiling of regenerative processing of railway wheel pairs. High efficiency is achieved when processing use of carbide inserts with multiply by nanostructure-composite coatings on the basis of the three-layer system Ti–TiN–TiAlCrN formed when using process filtered cathodic vacuum arc deposition on the installation VIT-2. Studied the mechanism of wear carbide inserts BNMX (ISO) developed coatings, which revealed the absence of typical conditions of the heavy processing with* $v = 40$ *to 80 m/min;* $S = 0{,}8...1{,}2$ *mm/about;* $t = 4{,}0...8{,}0$ *mm chips and destruction of the cutting edges of the plates. Resistance plates with the developed coatings up to 2 times the resistance of plates with commercial coatings standard types.*

***Keywords:*** *nanostructured multilayer composite coatings, filtred cathodic vacuum arc deposition, heavy cutting conditions, the cutting tool.*

## Введение

Общепринято считать применение очень твердых и износостойких покрытий, но обладающих относительно невысокой вязкостью и прочностью, недостаточно эффективным для тяжелых и прерывистых операций обработки. Для подобных операций характерно воздействие на инструмент чрезвычайно высоких термомеханических напряжений, следствием которого являются потеря формоустойчивости режущего клина инструмента и быстрое разрушение относительно хрупких покрытий. Для материалов с наноразмерными зернами отмечаются высокая развитость межзеренных границ и повышение их роли в упрочнении материала. При этом можно уверенно прогнозировать резкое возрастание способности таких покрытий сопротивляться разрушению, в том числе и при заметных пластических изменениях формы режущего клина инструмента в процессе его эксплуатации.

Одной из самых сложных и тяжело нагруженных операций резания является восстановительная обработка поверхности катания железнодорожных колесных пар, которые в процессе эксплуатации подвергаются "перенаклепу", металл поверхностного слоя колес приобретает повышенную хрупкость с низкой усталостной прочностью и повышенной вероятностью внезапного разрушения. Удаление дефектного слоя поверхности колесных пар с твердостью HRC ≥ 55...60 ведется при глубинах резания, превышающих 5...6 мм, что создает чрезвычайно тяжелые условия для работы

инструмента вследствие возникновения высоких термомеханических напряжений, имеющих знакопеременный характер.

В практике формообразования и восстановления профиля поверхностей катания колесных пар на железных дорогах широко используют процессы токарной, фрезерной и абразивной обработки. Наибольшее применение для обточки профиля катальной поверхности железнодорожных колес получили процессы токарной обработки [2].

Для обточки поверхности катания колес используют несколько типов сменных многогранных пластин (СМП) из твердых сплавов. Каждый из типоразмеров СМП может быть изготовлен из твердых сплавов различных марок, причем качество изготовления и эксплуатационные характеристики твердосплавных СМП различных производителей колеблются в широких пределах. Это негативно сказывается на эффективности и качестве репрофилирующей обработки железнодорожных колес, ведет к росту затрат на инструмент и производство в целом [1, 2].

Краткий анализ использования СМП из твердых сплавов показывает, что стоимость их среднегодового расхода составляет десятки миллионов долларов. Таким образом, повышение работоспособности СМП, используемых при репрофилирующей обработке нагартованных поверхностей железнодорожных колес, может служить хорошим резервом экономии дорогостоящих твердых сплавов и средств на их закупку. В этой связи в статье рассмотрена возможность повышения стойкости твердосплавных пластин формы LNMX (ISO) из твердого сплава Т14К8 (ISOP20-P30) при высокопроизводительной репрофилирующей восстановительной обработке железнодорожных колесных пар путем нанесения износостойких покрытий.

Среди основных направлений совершенствования функциональных покрытий для тяжелых условий обработки наиболее многообещающей является концепция многослойных покрытий с наноразмерными зернами и толщинами субслоев. Это связано с тем, что подобные покрытия обеспечивают не только повышение поверхностной твердости, теплостойкости и износостойкости инструмента, но и одновременно имеют высокую межслойную адгезию, сниженный уровень внутренних напряжений, сбалансированность свойств по твердости и вязкости. Подобные покрытия с повышенной трещиностойкостью сохраняют свою работоспособность без разрушений и отслаиваний от субстрата значительно более длительное время даже при термопластических деформациях режущей части твердосплавного инструмента и в условиях действия циклических термомеханических напряжений [1–5].

Известно, что первопричиной разрушения материалов стандартной (микрометрической) структуры с размерами зерен $d > 1$ мкм является формирование трещин, возникающих вследствие концентрации дислокаций у различных дефектов. В наноструктурированных материалах с размерами зерен $d < 80...100$ нм проявляется иной механизм разрушения [4–7]. Для подобных материалов превалирующей причиной разрушения являются процессы на межзеренных границах, что связано с меньшим или сравнимым количеством атомов в зернах по сравнению с их количеством на границах. Это сильно трансформирует межзеренное взаимодействие, приводя к торможению движения и генерации дислокаций, препятствуя зарождению, ветвлению и движению трещин вследствие упрочнения границ зерен. Дислокации в наноразмерных зернах практически не возникают из-за полного торможения на их границах, а сами границы начинают играть решающую роль в деформировании и разрушении материала, что позволяет создавать уникальные свойства нанокристаллических материалов, а при размерах зерен $d < 5...10$ нм прогнозировать формирование субатомных нанокристаллических структур и соответствующее направленное изменение свойств материалов [8, 9]. С учетом обеспечения высокой прочности адгезионной связи между покрытием и субстратом, а также химической пассивности материала покрытия по отношению к обрабатываемому материалу можно уверенно прогнозировать повышение сопротивляемости изнашиванию и стойкости режущего инструмента с многослойно-композиционными наноструктурированными покрытиями при любых механизмах его изнашивания и разрушения (пластическое, хрупкое, абразивное, адгезионно-усталостное, химико-окислительное, диффузионное и т.д.) [4–6].

Основной целью настоящей работы являлось повышение стойкости твердосплавного инструмента для тяжелых условий репрофилирующей обработки железнодорожных колесных пар путем нанесения на его рабочие поверхности покрытий многослойно-композиционной архитектуры с нанометрической структурой.

## 1. Методика проведения исследований

### *Методика получения покрытия*

При изготовлении образцов режущих инструментов с наноструктурированными композиционно-многослойными покрытиями использовали процессы фильтруемого катодно-вакуумно-дугового осаждения (ФКВДО), позволяющие управлять структурой покрытий и формировать наноразмерные зерна и толщину субслоев путем:

введения дополнительной энергии, поставляемой в осаждаемое покрытие, а также превращения кинетической энергии бомбардирующих ионов в тепловую энергию локальных объемов материала субстрата, на которые осуществляется воздействие, с последующим охлаждением с чрезвычайно высокой скоростью, порядка 1014 К/с;

увеличения плотности островков (центров) зародышеобразования покрытий;

стимулирования плазмохимических реакций синтеза соединений при введении тепловой энергии непосредственно в поверхность и роста подвижности атомов;

стимулирования диффузионных процессов на границах раздела "покрытие–субстрат", повышающих прочность их адгезионных связей.

Варьирование энергии и плотности потока бомбардирующих ионов при использовании вакуумно-дуговых процессов ФКВДО позволяет управлять размерами зерен, кристаллохимической структурой.

На основе процесса ФКВДО была разработана технология нанесения покрытий на твердосплавные СМП для тяжелой репрофилирующей обработки нагартованной поверхности колесных пар. При этом использовали методическое положение, согласно которому состав, структура и свойства каждого из слоев покрытия должны отвечать условиям внешнего термомеханического воздействия на инструмент, а само покрытие, выполняющее роль промежуточной технологической среды между инструментальным и обрабатываемым материалами, должно максимально повышать эффективность операции обработки.

Нанесение покрытий на различные типы режущего инструмента производили на вакуумно-дуговой установке ВИТ-2. При разработке функциональных покрытий для режущего инструмента была принята концепция трехслойной архитектуры [2]. Подобная концепция предусматривает использование износостойкого верхнего слоя (контактирует с обрабатываемым материалом), промежуточного многофункционального слоя (осуществляет адгезионную связь между верхним и нижним слоями покрытия, а также специальные функции) и адгезионного подслоя, непосредственно контактирующего с инструментальным материалом (осуществляет адгезионную связь между покрытием и субстратом в целом). Причем верхний и промежуточный слои имеют многослойную конструкцию, содержащую субслои нанометрической толщины [2, 6, 7]. Предложенная архитектура в наибольшей степени отвечает требованиям к покрытиям для тяжелых условий обработки [2].

При разработке методики выбора состава и свойств верхнего слоя покрытия в качестве модели изнашивания был выбран наиболее универсальный механизм адгезионно-усталостного изнашивания режущего инструмента. В соответствии с выбранной моделью теряемую массу инструмента $M_ф$ оценивали по формуле, подробно описанной в работе [1],

$$M_ф = K_a \rho F_a (J \sigma_a / \sigma_p); \quad M_ф \to \min,$$

где $K_a$ – коэффициент адгезии (объемный); $\rho$ – плотность инструментального материала; $J$ – интенсивность адгезии; $\sigma_a$ – прочность связей в узлах адгезии; $\sigma_p$ – сопротивляемость инструментального материала разрушению; $F_a$ – номинальная площадь контакта.

При использовании принятой методики качественно оценивали условия начала интенсивной адгезии и склонность к адгезионному взаимодействию инструментального и обрабатываемого материалов. Такая склонность будет возрастать при следующих условиях:

при увеличении температуры (до момента начала интенсивного окисления и разупрочнения мостиков адгезии);

при увеличении частоты собственных колебаний валентных атомов, которая коррелирует со статистическим весом атомов наиболее стабильных электронных конфигураций (СВАСК);

при росте скорости подвижности дислокаций $V_D$, которая обратно пропорциональна твердости инструментального материала (покрытия).

Для улучшения адгезии между покрытием и инструментальным материалом (субстратом) при формировании функционального покрытия использовали адгезионные металлические подслои (например, Ti, Zr и др.) или нитриды переходных металлов (например, TiN, ZrN и др.), или подслои нитридов металлов (TiN, CrN, ZrN), которые вводили между материалами покрытия и субстрата. Промежуточные слои различного функционального назначения (трибопассивные, износостойкие и т.д.), например на основе систем Ti–N, Cr–N, Ti–Al–N, Ti–Cr–N, Ti–Al–Cr–N и др., наносили для получения композиционных покрытий с общей толщиной, соответствующей условиям применения покрытия в целом.

Стандартная процедура подготовки образцов инструмента с покрытием для исследований заключалась в предварительной химически активированной мойке с применением ультразвука и последующей тонкой очистке спиртом с протиркой фланелью. Затем образцы закрепляли в специальных приспособлениях и размещали в вакуумной камере установки ВИТ-2, которая полностью поддерживает процессы и технологию ФКВДО. Установка была оснащена механизмом планетарного перемещения инструмента в вакуумной камере с различными скоростями ($n$ = 1,0...5,0 мин$^{-1}$). После создания вакуума порядка $p$ = 0,01 Па поверхность образцов подвергали тонкой очистке путем бомбардировки ионами газа (Ar) или ионами металла (Ti, Zr, Cr) с последующей термоактивацией инструмента электронами, генерируемыми из тлеющего разряда. Затем следовал процесс формирования покрытия.

### *Методика исследования свойств покрытий*

Микроструктурные исследования износостойких комплексов выполняли с помощью электронного сканирующего микроскопа LSM-6480LV фирмы JEOL (Япония) с приставкой для энергодисперсионной спектрометрии INCA ENTRGY Dry Cool фирмы Oxford Instruments (Великобритания). С помощью приставки для энергодисперсионной спектрометрии проводили измерение элементного состава слоев покрытия с получением распределения элементов вдоль линии и по заданной площади, что позволяло оценивать не только состав эпитаксиальных слоев, но и их толщину. Для получения дополнительной информации о микроструктуре рельефа поверхности покрытия использовали полевой эмиссионный электронный сканирующий микроскоп JSM-6700F с приставкой для энергодисперсионной спектроскопии JTD-2300F фирмы JEOL (Япония).

Макроскопические свойства многослойно-композиционных покрытий, такие как толщина, твердость, коэффициент трения, прочность сцепления покрытия с основой, определяли стандартными методами. В частности, измерение толщины покрытий проводили с помощью калотеста и методом обратного β-излучения на приборе Fisherscope MMS компании Helmut Fisher GmbH (ФРГ).

Для оценки микротвердости покрытий, в том числе и по толщине (толщина покрытий составляла 2...5 мкм), использовали нанотестер А-600 фирмы Micro Materials Ltd (Великобритания), который позволяет измерять микротвердость на "косом шлифе" или по торцу образца-свидетеля с локальностью до 100 нм.

### *Методика исследований режущих свойств инструмента с покрытием*

Исследовали режущие свойства инструмента, оснащаемого СМП формы LNMX (ISO) из твердого сплава Т14К8 (ISOP30) с разработанными составами наноструктурированных многослойно-композиционных покрытий, при сухом точении нагартованной поверхности железнодорожных колес на тяжелых токарных станках типа Rafamet UCB-125 и UBB-112 на следующих режимах обработки: v = 40...80 м/мин; $S$ = 0,8...1,2 мм/об; $t$ = 4,0...8,0 мм.

Оценку работоспособности СМП производили по коэффициенту стойкости относительно исходных СМП из Т14К8, принятых за единицу при испытаниях с указанными режимами обработки при предельном износе по задней поверхности $h_з$ = 0,5 мм, а также по коэффициенту вариации стойкости v. Производили сравнение стойкости СМП формы LNMX из твердого сплава, широко представленных на международных и российских рынках

## 2. Результаты исследований и обсуждение

Исследовали основные параметры покрытий – микротвердость, толщину, адгезионную прочность системы "покрытие–субстрат", морфологию поверхности, а также контролировали состав композиционного слоя (Ti, Cr, Al) [6]. Результаты исследований параметров, структуры и морфологии поверхности разработанных функциональных покрытий Ti–TiN–TiCrAlN представлены в табл. 1. Многослойно-композиционное покрытие получено при осаждении в течение 1 ч.

Анализ данных, представленных в табл. 1, позволяет отметить следующее.

Износостойкий слой (Ti, Cr, Al)N имеет супермногослойную архитектуру с толщиной субслоев 15...25 нм. Среднее соотношение Ti, Cr и Al в износостойком слое TiCrAlN составило соответственно 0,2; 0,18; 0,11. TiCrAlN-слой имеет столбчатую структуру, ориентированную перпендикулярно к плоскости подслоя TiN. Толщина субслоев промежуточного

*Таблица 1*

**Архитектура и параметры слоев функционального покрытия на основе композиции Ti–TiN–TiCrAlN, полученного при использовании технологии ФКВДО**

| Архитектура элементов покрытия | Толщина | Микротвердость*, ГПа | Адгезионная прочность покрытия $P_{кр}$, Н |
|---|---|---|---|
| Адгезионный подслой Ti (монослойный) | $h_а$ = 0,2...0,3 мкм | – | 120 |
| Промежуточный слой TiN (многослойный) | $h_п$ = 1,8 мкм; $h_с$ = 15 нм | – | |
| Износостойкий слой ** $Ti_{0,2}Cr_{0,18}Al_{0,11}N_{0,5}$ (многослойный) | $h_и$ = 2,0 мкм; $h_с$ = 25 нм | 32,0 | – |

О б о з н а ч е н и я: $h_а$ – толщина адгезионного подслоя; $h_и$, $h_п$ – толщины износостойкого и промежуточного слоев соответственно; $h_с$ – толщина субслоев износостойкого и промежуточного слоев; $P_{кр}$ – критическое значение усилия, прилагаемого к скрайбирующему (царапающему) индентору, при котором происходит разрушение покрытия вдоль царапины.

* Значение микротвердости получено на наноиндентометре с поверхности образца.

** Нижними индексами показан состав покрытия, %.

*Таблица 2*

**Результаты сравнительных стойкостных исследований СМП формы LNMX**

| Номер | Состав и архитектура покрытия | Толщина покрытия, мкм | Стойкость, мин | Коэффициент вариации стойкости ν | Коэффициент стойкости $K_{ст} = T_c/T$ |
|---|---|---|---|---|---|
| 1 | TiN–TiCN–TiN | 9,0 | 45,6 | 0,448 | 1,18 |
| 2 | TiCN–$Al_2O_3$–TiN | 10,0 | 26,4 | 0,452 | 1,05 |
| 3 | TiC–TiCN–TiN | 10,0 | 25,0 | 0,460 | 0,64 |
| 4 | Ti–TiN–TiCrAlN | 4,0 | 88,1 | 0,355 | 2,19 |

Обозначения: $T_c$ – среднее значение стойкости инструмента с покрытием; $T$ – среднее значение стойкости контрольного инструмента без покрытия.

слоя TiN также составляет порядка 25 нм, что позволяет классифицировать многослойно-композиционное покрытие как наноструктурированное [6, 8]. При использовании технологии ФКВДО микрокапельная составляющая на поверхности слоя TiCrAlN, во внутренних слоях покрытия и на границах раздела "покрытие–субстрат" составляет не более 10 %, что резко повышает качество и надежность инструмента с подобным покрытием.

Результаты сравнительных испытаний стойкости инструмента, оснащенного СМП тангенциальной формы LNMX из сплава Т14К8 с покрытием Ti–TiN–TiCrAlN толщиной $h_п$ = 3,5...4,0 мкм (№ 4), и стойкости СМП формы LNMX с коммерческими покрытиями последнего поколения (№ 1 и 3) представлены в табл. 2.

Установлена высокая эффективность СМП формы LNMX из твердого сплава Т14К8 с разработанными наноструктурированными многослойно-композиционными покрытиями по сравнению с коммерческими аналогами при тяжелой восстановительной обточке катальной поверхности колесных пар. В частности, отмечены не только более высокие средние значения стойкости (88,1 мин) и коэффициента стойкости $K_{ст}$ (2,19), но и снижение коэффициента вариации стойкости (ν = 0,355). Последнее свидетельствует о существенном повышении надежности тангенциальных СМП формы LNMX из сплава Т14К8 с разработанными наноструктурированными покрытиями для высокоэффективной тяжелой восстановительной обточки дефектной поверхности железнодорожных колесных пар.

## Заключение

Разработана методика формирования наноструктурированных многослойно-композиционных покрытий, предназначенных для высокоэффективной тяжелой обработки. Конструирование многослойных покрытий, исходя из выбора материала каждого отдельного слоя в соответствии с функциональным назначением при оптимизации их последовательности и толщин, позволяет конструировать свойства и эксплуатационные характеристики инструмента с покрытием в целом. Установлена высокая эффективность СМП формы LNMX из твердого сплава Т14К8 с разработанными наноструктурированными многослойно-композиционными покрытиями по сравнению с коммерческими аналогами при высокоэффективной тяжелой восстановительной обточке катальной поверхности колесных пар. В частности, отмечено не только более высокое среднее значение стойкости (88,1 мин) и коэффициента стойкости $K_{ст}$ (2,19), но и снижение коэффициента вариации стойкости (ν = 0,355).

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК


1. **Vereschaka A.S.** Working capacity of the cutting tool with wear resistant coatings. M: Mashinostroenie, 1993. 336 p.

2. **Vereschaka A.** Improvement of working efficiency of cutting tools by modifying its surface properties by application of wear-resistant complexes // Advanced Materials Research. 2013. Vol. 712–715. Trans Tech Publications, Switzerland. P. 347–351.

3. **Koch C.C.** Bulk Behavior of Nanostructured Materials //North Carolina State University Annals. 2002. Ch. 6. P. 184–232.

4. **Panckow A.N.** Application of novel vacuum-arc ion-plating technologies for the design of advanced wear resistant coatings / A.N. Panckow, J. Steffenhagen, D. Wegener et al. // Surface and Coating Technologies. 2001. Vol. 138. P. 71–76.

5. **Okumiya M., Gripentrog M.** Mechanical properties and tribological behavior of TiN–CrAlN and CrN–CrAlN multilayer coatings // Surface and Coating Technologies. 1999. Vol. 112. P. 123–128.

6. **Vereschaka A.S., Grigoriev S.N., Sotova E.S., Vereschaka A.A.** Improving the efficiency of the cutting tools made of mixed ceramics by applying modifying nano-scale multilayered coatings // Advanced Materials Research. 2013. Vol. 712–715. Trans Tech Publications. P. 391–394.

7. **Vereschaka A.S., Vereschaka A.A., Kirillov A.K.** Ecologically friendly dry machining by cutting tool from layered composition ceramic with nano-scale multilayered coating // Key Eng. Materials. 2012. Vol. 496. P. 67.

8. **Grigoriev S.N., Vereschaka A.A., Vereschaka, A.S., Kutin A.A.** Cutting tools made of layered composite ceramics with nano-scale multilayered coatings // Procedia CIRP. 2012. Vol. 1. P. 318–323.

9. **Konig W.G., Osterhaus K., Gerschwiller U.A.** Kuhlschmierstoff-Eine Okologische Herausforderung an die Fertigungstechnik. In: Wettbebsfactor Produktionstechnik – Aachener Perspektiven. Hrsg.: AWK Aachener Werkzeugmaschinen-Kolloquium. VDI-Verlag GmbH, Dusseldorf. 1993.

УДК 67.017

**А.С. Верещака** *(МГТУ "СТАНКИН", Университет машиностроения),*
**А.А. Верещака** *(МГТУ "СТАНКИН"),* **А.И. Булычева** *(ФГУП "НПО "Техномаш")*
*E-mail: dr_averes@rambler.ru*

# Многослойные нанодисперсные покрытия для режущего инструмента

*Рассматриваются вопросы применения трехслойных композиционных покрытий для режущего инструмента с нанодисперсной зерновой структурой и наноразмерной толщиной субслоев. Показано, что режущие инструменты с наноразмерной зерновой и субслойной структурой обеспечивают существенное повышение эффективности обработки по сравнению с инструментами, имеющими стандартные покрытия с аналогичным химическим составом.*

***Ключевые слова:*** *нанодисперсные многослойные покрытия, структура, фильтруемые вакуумно-дуговые процессы, стойкость инструмента.*

*Discusses the use of three-layer composite coating with nano-grain structure and a dispersed nano-sized thickness of sublayers each of the coating layers for a cutting tool. It is shown that the cutting tools with nano-scale structure can provide a substantial increase in machining efficiency compared with the tools having standard coating components with similar chemical composition.*

***Keywords:*** *nano-scale multilayer coating, structure, filtered cathodic vacuum-arc deposition, tool life.*

## Введение

Нанодисперсные покрытия обеспечивают существенное повышение работоспособности различных типов режущего инструмента. Это связано с особенностью нанодисперсных материалов, обладающих увеличенной площадью межзеренных границ и сбалансированным соотношением твердости, оказывающей определяющее влияние на износостойкость, и ударной вязкости, существенно влияющей на сопротивляемость инструмента отказам в виде макро- и микрохрупкого разрушения, особенно в условиях действия термомеханических напряжений, имеющих циклический характер [1–3]. Известно, что первопричиной разрушения материалов стандартной (микрометрической) структуры с размерами зерен $d > 1$ мкм является формирование трещин, возникающих вследствие концентрации дислокаций у различных дефектов структуры. В нанодисперсных материалах с размерами зерен $d < 80...100$ нм проявляется иной механизм разрушения [4–7]. Для подобных материалов превалирующей причиной разрушения являются процессы на межзеренных границах, что связано с меньшим или сравнимым количеством атомов в зернах по сравнению с их количеством на границах. Это сильно трансформирует межзеренное взаимодействие, приводя к торможению движения и генерации дислокаций, препятствуя зарождению, ветвлению и движению трещин вследствие упрочнения границ зерен. Дислокации в наноразмерных зернах практически не возникают из-за их полного торможения на границах, которые начинают играть решающую роль в деформировании и разрушении материала. Результатом являются уникальные свойства нанокристаллических материалов, а при размерах зерен $d < 5...10$ нм прогнозируются формирование субатомных нанокристаллических структур и соответствующее направленное изменение свойств материалов [8, 9].

С учетом необходимости обеспечения высокой прочности адгезионной связи между покрытием и субстратом (инструментальным материалом), а также химической пассивности материала покрытия по отношению к обрабатываемому материалу можно уверенно прогнозировать повышение сопротивляемости изнашиванию и стойкости режущего инструмента с многослойно-композиционными нанодисперсными покрытиями при любых механизмах его изнашивания и разрушения (пластическое, хрупкое, абразивное, адгезионно-усталостное, химико-окислительное, диффузионное и т.д.) [4–6].

Для функциональных покрытий, предназначенных для нанесения на режущий инструмент, чрезвычайно важны не только архитектура, состав, структура, кристаллохимические и физико-механические свойства, адгезионная прочность по отношению к субстрату, но и длительность работы покрытий на контактных площадках инструмента до момента его разрушения (долговечность) за период стойкости режущего инструмента.

В настоящее время до 95 % инструмента из твердых сплавов и до 60 % инструмента из быстрорежущей стали выпускается с композиционно-многослойными покрытиями. При этом все шире используют композиционные наноструктурированные покрытия. В частности, компания Sandvik Coromant, в 1970 г. одна из первых в мире освоившая серийный выпуск сменных

многогранных пластин (СМП) с покрытием TIC (серия GC, метод нанесения CVD) и в настоящее время являющаяся одним из мировых лидеров производства СМП из твердых сплавов с покрытием, разработала новое композиционно-многослойное покрытие TiN–TiN/$Al_2O_3$–TiCN для пластин серии GC 2025, в котором слой TiN/$Al_2O_3$ состоит из субслоев наноразмерной толщины с нанокристаллическими зернами. Пластины GC 2025 имеют стойкость до 2–2,5 раз выше стойкости пластин со стандартным многослойным покрытием [10]. Ведущие производители износостойких покрытий, получаемых методами физического осаждения (PVD), – Balzers, Cemicon, Metaplas, Leybold, Platit и др. – создали гамму наноструктурированных покрытий для нанесения на режущие инструменты. В частности, фирма Platit (Швейцария) разработала двухфазные наноструктурированные покрытия с размерами зерен до 5 нм, в которых основным износостойким элементом являются зерна (Al, Cr)N или (Ti, Al)N – основная нанокристаллическая фаза, – на границах которых располагается вторая нанокристаллическая (или аморфная) фаза $Si_3N_4$, сдерживающая коагуляцию зерен основной фазы как при осаждении покрытия (вакуумно-дуговая технология), так при эксплуатации инструмента. Исследования по разработке аналогичных наноструктурированных покрытий нового поколения проводят фирмы Balzers, Metaplas, Cimicon и др.

Несмотря на существенные успехи, связанные с внедрением режущего инструмента с покрытием, до настоящего времени именно инструмент остается наиболее слабым звеном технологической системы резания. Для повышения эффективности этой системы требуется дальнейшее совершенствование инструмента, в частности за счет применения инновационных типов покрытий, имеющих многослойно-композиционную архитектуру и наноразмерную зерновую структуру со слоями различных композиционного состава и функционального назначения.

## Методика формирования многослойно-композиционных наноструктурированных покрытий для режущего инструмента

При изготовлении образцов режущих инструментов с нанодисперсными композиционно-многослойными покрытиями (НКМП) использовали технологию фильтруемого катодно-вакуумно-дугового осаждения (ФКВДО) конденсируемого на поверхность субстрата ионного потока с ассистированием высокоэнергетическими ионами (энергии порядка 1,0...10,0 КэВ). Ассистируемые бомбардировкой процессы ФКВДО позволяют управлять структурой покрытий, способствуют формированию наноразмерных зерен и слоев покрытия за счет:

энергии, поставляемой в осаждаемый конденсат, и превращения кинетической энергии бомбардирующих ионов в тепловую для локальных объемов, в которых осуществляется воздействие, с последующим охлаждением с чрезвычайно высокой скоростью – порядка 1014 K/c;

увеличения плотности островков (центров) зародышеобразования покрытий;

стимулирования роста подвижности атомов при плазмохимических реакциях синтеза материала покрытия путем введения тепловой энергии непосредственно в поверхность;

стимулирования диффузионных процессов на границах раздела "покрытие–субстрат", повышающих прочность их адгезионных связей.

Регулируя энергию и плотность потока бомбардирующих ионов при использовании вакуумно-дуговых процессов и технологии ФКВДО, можно управлять размерами и ориентацией зерен, кристаллохимической структурой.

При использовании технологии ФКВДО формирование наноструктурированных покрытий на рабочих поверхностях режущих инструментов осуществляли при использовании следующих процессов:

ассистирующей бомбардировки (импульсной или постоянной) металлическими или газовыми ионами с энергиями от 1,0 до 10 КэВ для эффективного смешивания элементов осаждаемого конденсата;

имплантации в осаждаемый конденсат элементов внедрения (ионов металла или газа) для сдерживания роста размеров зерен при температурах синтеза покрытия и обеспечения высокой прочности адгезионной связи между покрытием и субстратом (инструментальным материалом);

повышения степени ионизации конденсируемого пароплазменного потока для снижения температуры синтеза покрытия и сдерживания роста размеров зерен;

планетарного перемещения инструмента относительно плазменного потока с различными скоростями для создания слоев наноразмерной толщины многослойно-композиционного покрытия, конденсируемого на субстрат.

Ассистируемый процесс ФКВД-осаждения покрытий на режущий инструмент характеризуется несколькими эффектами, которые связаны с перемешиванием конденсируемых слоев и формированием вторичных фаз. К таким эффектам можно отнести:

формирование покрытий высокой плотности и однородной нанодисперсной структуры при обеспечении прочной адгезионной связи в системе "покры-

тие–субстрат", включая композиционные и многослойные покрытия, без чрезмерного внешнего нагрева, что исключает отпуск и коробление режущих кромок инструмента, особенно из быстрорежущей стали;

существенное снижение внутренних напряжений в покрытиях и на границах раздела "покрытие–субстрат";

уменьшение размеров зерен до нанометрических и вероятности их коагуляции за счет снижения температур при конденсации слоев покрытия;

непрерывное легирование конденсируемого покрытия по всему объему, что позволяет обеспечивать его достаточную пластичность при высокой и супервысокой твердости, а также формировать на границах зерен основной фазы тонкие слои вторичной фазы (нанокристаллической или аморфной), препятствующей коагуляции зерен основной фазы как при формировании покрытия, так и при эксплуатации инструмента с покрытием при температурах резания.

## Задачи исследования и условия проведения экспериментов

Для реализации концепции НМКП, содержащих адгезионный подслой, износостойкие и промежуточные (барьерные) слои, каждый из которых имеет строго функциональное назначение [11], была разработана технология синтеза покрытий на базе процессов ФКВДО. При этом использовали методологическое положение, согласно которому состав, структура и свойства каждого из слоев покрытия должны отвечать условиям внешнего термомеханического воздействия на инструмент, а само покрытие, выполняющее роль промежуточной технологической среды между инструментальным и обрабатываемым материалами, должно максимально повышать эффективность операции обработки.

При разработке инструмента с многослойно-композиционным наноструктурированным покрытием решали следующие задачи:

выбор состава функциональных слоев покрытия в зависимости от условий внешнего термомеханического нагружения;

обеспечение структуры каждого из слоев покрытия, а также границ разделов, отвечающих условиям внешнего воздействия.

Одной из важнейших задач при разработке инструмента с НКМП является выбор состава и свойств материала покрытия в зависимости от условий обработки и прежде всего свойств обрабатываемого материала с учетом их изменений при деформации и разрушении. При конструировании НКМП чрезвычайно важным является выбор состава и свойств верхнего (износостойкого) слоя покрытия. В качестве модели была выбрана наиболее универсальная модель адгезионно-усталостного изнашивания, в соответствии с которой теряемую массу инструмента $M_a$ оценивали по формуле

$$M_a = K_a \rho F_a (J \sigma_a / \sigma_p). \quad (1)$$

Здесь $K_a$ – коэффициент адгезии (объемный); $\rho$ – плотность инструментального материала; $J$ – интенсивность схватывания, $J = N_т + N_м$; $\sigma_a$ – прочность связей в узлах схватывания; $\sigma_p$ – сопротивляемость инструментального материала разрушению; $F_a$ – номинальная площадь контакта; $N_т$, $N_м$ – число активных центров, приходящихся на единицу площади контакта при термическом и механическом активировании соответственно,

$$N_т = \nu T \mathbf{e}^{-Q_T / K\theta}, \quad (2)$$

где $\nu$ – частота собственных валентных колебаний атомов; $T$ – время; $Q_T$ – энергия термической активации; $K$ – постоянная Больцмана; $\theta$ – абсолютная температура;

$$N_м = \rho_1 S b, \quad (3)$$

где $\rho_1$ – плотность дислокаций; $S$ – средняя длина пробега дислокации; $b$ – вектор Бюргерса.

При выборе материала наружного (износостойкого) компонента НКМП, контактирующего с обрабатываемым материалом (ОМ), исходили из положения о корреляции интенсивности адгезии $J$ от твердости соединения, а теплостойкости верхнего слоя – от температуры плавления тугоплавкого соединения.

Согласно конфигурационной модели строения вещества (КМВ) наибольшими твердостью и жесткостью обладают вещества (соединения) с превалирующим статистическим весом атомов наиболее стабильных конфигураций (СВАСК) типа $sp^3$, $s^2p^6$ и $d^5$ с различными типами связей кристаллической решетки (нитриды, карбиды и карбонитриды тугоплавких металлов IV группы Периодической системы элементов). Такие соединения имеют чрезвычайно низкую податливость кристаллической решетки, что затрудняет движение дислокаций и обеспечивает НКМП минимальную склонность к механическому и термическому активированию, снижает склонность НКМП к адгезионному взаимодействию с ОМ. Поэтому при выборе состава наружного слоя НКМП предпочтение отдавали наиболее твердым и тугоплавким соединениям, содержащим максимальное количество СВАСК типа $sp^3$ (материалы с преимущественно металлическими связями), $s^2p^6$ (материалы со смешанными типами свя-

зей) и $d^5$ (материалы с ковалентными и ионными связями), легированных Al и Cr. В качестве адгезионного компонента НКМП использовали соединения с металлическими связями (переходные тугоплавкие металлы IV группы или их нитридные и карбидные соединения), а для промежуточных компонентов – ИК-инертные соединения с ионными и ковалентными связями.

Стандартные процедуры приготовления образцов инструмента с покрытием для исследований заключались в следующем. Инструмент из быстрорежущей стали (сверла), сменные многогранные пластины (СМП) из твердых сплавов для оснащения резцов и торцовых фрез, цельнотвердосплавный инструмент (сверла) подвергали предварительной химически активированной мойке с применением ультразвука и последующей тонкой очистке спиртом с протиркой фланелью. Затем образцы закрепляли в специальных приспособлениях и размещали в вакуумной камере установки ВИТ-3, которая полностью поддерживает процессы и технологию ФКВДО. Установка ВИТ-3 была оснащена механизмом планетарного перемещения инструмента в вакуумной камере с различными скоростями. После создания вакуума порядка $p$ = = 0,01 Па поверхности образцов подвергали тонкой очистке путем бомбардировки ионами газа (Ar) и термоактивации электронами, генерируемыми из тлеющего газового (Ar) разряда. Затем следовал процесс формирования покрытия.

Для образцов инструмента из быстрорежущей стали формировали термостабилизирующий слой путем ионного азотирования в несамостоятельном газовом Ar/N-разряде при оптимальных параметрах процесса, что позволяло увеличить твердость HV приповерхностных слоев быстрорежущей стали на глубине до 100 мкм на 45 %. Затем формировали адгезионный подслой и функциональный слой многослойно-композиционного покрытия. Нанесение покрытия осуществляли при давлении азота порядка 0,5 Па.

Анализ влияния параметров процесса синтеза на различные свойства композиционных покрытий (на примере системы Ti–TiN–TiCrAlN) позволил установить, что наиболее значимыми параметрами являются ток дуги титанового катода $I_{Ti}$, давление азота в вакуумной камере $p_N$, напряжение смещения на субстрате (инструменте) в процессе конденсации износостойкого слоя $U_к$. Эти параметры и были приняты в качестве основных при проведении исследований по установлению их влияния на состав, структуру и свойства синтезируемых композиционных покрытий. Микроструктурные исследования НМКП выполняли с помощью электронного сканирующего микроскопа LSM-6480LV фирмы JEOL (Япония) с приставкой для энергодисперсионной спектрометрии INCA ENTRGY Dry Cool фирмы Oxford Instruments. С помощью приставки для энергодисперсионной спектрометрии проводили измерение элементного состава слоев покрытия с получением распределения элементов вдоль линии и по заданной площади, что позволяло оценивать не только состав эпитаксиальных слоев, но и их толщину. Для получения дополнительной информации о микроструктуре рельефа поверхности покрытия использовали полевой эмиссионный электронный сканирующий микроскоп JSM-6700F с приставкой для энергодисперсионной спектроскопии JTD-2300F фирмы JEOL (Япония).

Макроскопические свойства НМКП, такие как толщина, твердость, коэффициент трения, прочность сцепления покрытия с основой, определяли стандартными методами. В частности, измерение толщины проводили с помощью калотеста и методом обратного β-излучения на приборе Fisherscope MMS компании Helmut Fisher GmbH. Для оценки микротвердости покрытий, в том числе и по толщине (толщина покрытий составляла 2...5 мкм) использовали нанотестер А-600 фирмы Micro Materials Ltd, который позволяет измерять микротвердость на "косом шлифе" или по торцу образца-свидетеля с локальностью до 100 нм.

Эффективность полученных многослойно-композиционных покрытий сравнивали с соответствующими характеристиками инструмента, имеющего стандартные покрытия. Исследования проводили при "сухом" резании или использовании смазочно-охлаждающих технологических сред (СОТС) при точении, сверлении, фрезеровании сталей и труднообрабатываемых материалов с использованием стандартного станочного оборудования.

Основные условия точения стали 45 (180 НВ) твердосплавным инструментом в виде СМП, формы SNMG 120408 (ISOP25) следующие: v = 200...350 м/мин; $S$ = 0,201 м/мин; $t$ = 1,0 мм. Геометрические параметры режущей части резца имели следующие значения: $\varphi = \varphi_1 = 45°$; $\gamma = -9°$; $\alpha = 6°$; $\lambda = 0$.

## Результаты исследований

**Исследование параметров разработанных покрытий.** Результаты исследований структуры износостойкого слоя TiCrAlN и параметры сформированного покрытия представлены в табл. 1. Многослойно-композиционное покрытие, имеющее архитектуру Ti–TiN–TiCrAlN, получено при $I_{Ti}$ = 104 А; $p_N$ = 0,24 Па; $U_к$ = 42 В и осаждении в течение 60 мин.

Анализ данных, представленных в табл. 1, позволяет отметить следующее.

*Таблица 1*

**Результаты исследований параметров НМКП (на основе системы Ti–TiN–TiCrAlN)**

| Материал | Фазовый состав | Размеры зерен, нм | Толщины покрытия $h_c$, слоев $h_L$, субслоев $h_{s1}$, нм | Твердость HV, ГПа | $F_m$, Н | $\Delta P$, мг/см$^2$ |
|---|---|---|---|---|---|---|
| NMCC | Ti–TiN–TiCrAlN | 5...15 | $h_c$ = 4000 | 25,0...35,0 | 120...130 | 14,7 |
| Layer (1) | $Ti_{0,45}Cr_{0,35}Al_{0,2}N$ | 5...15 | $h_L$ = 2000; $h_{s1}$ = 15...25 | 35,0...40,0 | – | – |
| Layer (2) | TiN | 5...15 | $h_L$ = 1500; $h_{s1}$ = 15...25 | 23,0...30,0 | – | – |
| Layer (3) | Ti | 5...15 | $h_L$ = 500 | – | – | – |

Примечание. $F_m$ – критическое значение усилия, прилагаемого к скрайбирующему (царапающему) индентору, при котором происходит разрушение покрытия вдоль царапины.

Износостойкий слой TiCrAlN имеет супермногослойную архитектуру с толщиной 15...25 нм, столбчатую структуру, ориентированную перпендикулярно к плоскости подслоя TiN, размеры зерен которого не превышают 5...15 нм. Толщина субслоев промежуточного TiN-слоя также составляет 15...25 нм, а размеры его зерен, так же как и зерен адгезионного подслоев, не превышают 5...15 нм. Полученные результаты позволяют классифицировать многослойно-композиционное покрытие Ti–TiN–TiCrAlN как наноструктурированное. При использовании вакуумно-дуговой системы с фильтрацией пароионного потока ФКВДО отмечаются существенное повышение качества поверхности НМКП и практически полное отсутствие капельной составляющей, являющейся опасным дефектом, на поверхности покрытия.

**Исследование работоспособности инструмента.** Были проведены также аттестационные исследования различных типов режущего инструмента с разработанными покрытиями. Результаты исследований стойкости токарных резцов, оснащенных СМП из сплавов ТТ10К8Б (обработка стали) и ВРК-13 (обработка жаропрочного сплава ХН77ТЮР) с различными вариантами покрытий, представлены на рис. 1 и 2. В табл. 2 показаны результаты испытаний торцовых фрез ∅63 мм, оснащенных пластинами из быстрорежущей стали Р6М5 с v = 89 м/мин, $S_Z$ = 0,28 мм/зуб, $t$ = 1,5 мм при сухом симметричном фрезеровании легированной стали 20MnCr5.

Результаты испытаний инструмента из быстрорежущей стали и инструмента, оснащенного твердосплавными СМП с разработанными составами покрытий, показали их высокую эффективность при точении легированной стали 20MnCr5 (см. рис. 1), хромоникелевого сплава ХН77ТЮР (см. рис. 2), а также при симметричном торцовом фрезеровании стали 20MnCr5 (см. табл. 2). В частности, применение разработанных составов покрытий с наноразмерными субслоями как при "сухом" резании, так и при резании с жидкими СОТС, позволяет повысить стойкость инструмента в 2–5 раз при точении конструкционных сталей (на примере стали 20MnCr5) и труднообрабатываемых материалов (на примере хромоникелевого сплава ХН77ТЮР).

В частности, при оснащении торцовых фрез СМП из быстрорежущей стали Р6М5, подвергнутых комбинированной обработке, включающей предварительное азотирование в плазме несамостоятельного тлеющего разряда пластин на глубину до 25...30 мкм (термостабилизирующий слой) и последующее нанесение наноструктурированного многослойно-композиционного покрытия A–Ti–TiN(TiAlCr)N при использовании процесса ФКВДО, период стойкости фрез при симметричном фрезеровании увеличился до 4 раз по сравнению с периодом стойкости фрез без покрытия и в 2–2,5 раза по сравнению с аналогичным показателем для фрез с различными вариантами стандартных покрытий. Аналогичные результаты были получены при сверлении отверстий в легированной стали быстрорежущими сверлами из стали Р6М5, подвергнутыми комбинированной обработке, аналогичной обработке СМП из стали Р6М5 для оснащения торцовых фрез.

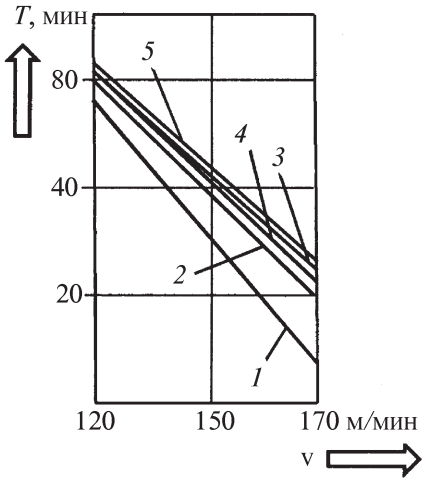



**Рис. 1. Влияние скорости резания на стойкость инструмента, оснащенного СМП из твердого сплава ТТ10К8Б с различными покрытиями при точении стали 20MnCr5 с $t$ = 1,5 мм; $S$ = 0,2 мм/об:**
*1* – ТТ10К8Б; *2* – ТТ10К8Б–TiN (технология arc-PVD); *3* – ТТ10К8Б–TiAlSiN (технология arc-PVD); *4* – ТТ10К8Б–(TiCN–$Al_2O_3$–TiN) (технология arc-PVD); *5* – ТТ10К8Б–(Ti–TiN–TiCrAlN) (технология ФКВДО)

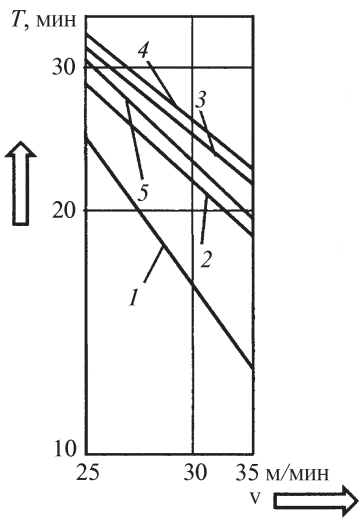



**Рис. 2. Влияние скорости резания на стойкость инструмента, оснащенного СМП из твердого сплава ВРК-13 с различными покрытиями, при точении жаропрочного сплава ХН77ТЮР с $t$ = 1,0 мм; $S$ = 0,15 мм/об:**
*1* – ВРК-13; *2* – ВРК-13–TiN (технология arc-PVD); *3* – ВРК-13–(TiCN–$Al_2O_3$–TiN) (технология arc-PVD); *4* – ВРК-13–(Ti–TiN–TiCrAlN) (технология ФКВДО); *5* – ВРК-13–TiAlSiN (технология arc-PVD)

*Таблица 2*

**Результаты стойкостных испытаний торцовых фрез**

| Покрытие | Период стойкости $T$, мин | |
|---|---|---|
| | $h_3$ = 0,2 мм | $h_3$ = 0,3 мм |
| Без покрытия (контрольные фрезы) | 19 | 36 |
| Стандартное TiN (arc-PVD) | 43 | 60 |
| Стандартное TiCN (arc-PVD) | 43 | 54 |
| Стандартное TiAlN (arc-PVD) | 62 | 66 |
| Стандартное TiCrN (arc-PVD) | 44 | 58 |
| Стандартное TiMoN (arc-PVD) | 76 | 92 |
| A*–Zr–ZrN–ZrCrAl (ФКВДО) | 82 | 118 |
| A*–Ti–TiN–TiCrAlN (ФКВДО)** | 112 | 158 |

* Азотированный термостабилизирующий слой.

** Наноструктурированное покрытие.

## Заключение

Разработанная методика нанесения нанодисперсных многослойно-композиционных покрытий на режущий инструмент позволяет обеспечить гамму свойств, значительно повышающих работоспособность инструмента из быстрорежущей стали и твердых сплавов.

Конструирование многослойных покрытий исходя из выбора материала каждого отдельного слоя в соответствии с функциональным назначением при оптимизации их последовательности и толщин позволяет конструировать свойства и эксплуатационные характеристики инструмента с покрытием в целом.

Показана принципиальная возможность выбора состава и свойств покрытия в соответствии с конфигурационным строением вещества и статистическим весом атомов наиболее стабильных электронных конфигураций (СВАСК). Рекомендовано при выборе материала верхнего слоя покрытия, непосредственно контактирующего с обрабатываемым материалом, отдавать предпочтение наиболее твердым и тугоплавким соединениям, содержащим максимальное количество СВАСК устойчивых конфигураций типа $sp^3$ (материалы с преимущественно металлическими связями). Для промежуточных слоев наиболее приемлемы материалы с конфигурациями $s^2p^6$ (материалы со

смешанными типами связи) и $d^5$ (материалы с ковалентными и ионными связями).

Установлено, что различные типы инструмента из быстрорежущей стали и твердых сплавов с разработанными покрытиями имеют период стойкости, в 1,5–5 раз превышающий соответствующий показатель для инструмента со стандартным покрытием, и позволяют увеличить производительность обработки за счет роста скорости резания на 20...60 %.

Показана высокая эффективность инструмента, оснащенного СМП формы LNMX (301940) из твердого сплава Т14К8 с разработанными нанодисперсными многослойно-композиционными покрытиями для тяжелых условий репрофилирующей обработки изношенных колесных железнодорожных пар, имеющего стойкость в 1,5–2,5 раза выше стойкости аналогов известных производителей.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**


1. **Koch C.C.** Bulk Behavior of Nanostructured Materials // North Carolina State University Annals. 2002. Chap. 6. P. 184–232.

2. **Либовиц Г.** Разрушение металлов. Т. 6. М.: Металлургия, 1976. С. 12–87.

3. **Финкель В.М.** Физические основы торможения разрушения. М.: Металлургия, 1977. 348 с.

4. **Application** of novel vacuum-arc ion-plating technologies for the design of advanced wear resistant coatings / A.N. Panckow, J. Steffenhagen, D. Wegener, et al. // Procedia CIRP 9C. 2013. Elsevier B.V. P. 8–12. Surface and Coating Technologies 138 (2001). P. 71–76.

5. **Okumiya M., Gripentrog M.** Mechanical properties and tribological behavior of TiN–CrAlN and CrN–CrAlN multilayer coatings // Surface and Coating Technologies. 1999. V. 112. P. 123–128.

6. **Bouzakis K.-D., Michailidis N., Skordaris G. et al.** Cutting with coated tools: Coating technologies, characterization methods and performance optimization // CIRP Annals – Manufacturing Technology. 2012. Vol. 61. P. 703–723.

7. **Gleiter H.** Nanostructured materials: basic concepts and microstructure // Acta mater. 2000. V. 48. P. 1–29.

8. **Simultaneously** Increasing the Ductility and Strength of Nanostructured Alloys / Yong-Hao Zhao, Xiao-Zhou Liao, Sheng Cheng, et al. WILEY-VCH Verlag GmbH & Co. KGaA: Weinheim, 2006. P. 123–132.

9. **Верещака А.С., Верещака А.А.** Повышение эффективности инструмента путем управления составом, структурой и свойствами покрытий // Упрочняющие технологии и покрытия. 2005. № 9. С. 9–18.

10. **Scherbarth S.** Moderne Schneidstoffe und Werkzeunge-Wege zur gesteigerten Produktivitat // Sandvik Coromant Gmbh. Schmalkalder Werkzeugtagung. 2005.

11. **Пат. РФ № 2198243.** Многослойно-композиционное износостойкое покрытие / А.А. Верещака и др. 10.02.2003 с приоритетом от 05.08.1998.

12. **Vereschaka A.A., Vereschaka A.S., Grigoriev S.N., Sladkov D.V.** Nano-Scale Multi-Layered Coatings for Cutting Tools Generated Using Assisted Filtered Cathodic-Vacuum-Arc Deposition (AFCVAD) // Applied Mechanics and Materials. Trans Tech Publications, Switzerland. 2013. Vol. 325–326. P. 1454–1459.

13. **Vereschaka A.A., Volosova M.A., Grigoriev S.N., Vereschaka A.S.** Development of wear-resistant complex for high-speed steel tool when using process of combined cathodic vacuum arc deposition // Procedia CIRC 9C (2013). Elsevier B.V. P. 8–12.

14. **Vereschaka Alexey.** Improvement of working efficiency of cutting tools by modifying its surface properties by application of wear-resistant complexes // Advanced Materials Research. Trans. Tech. Publications. Switzerland. 2013. Vol. 712–715. P. 347–351.



*ПОДПИСКА*

***Уважаемые читатели!***

**Продолжается подписка**

***на научно-технический и производственный журнал***

**"УПРОЧНЯЮЩИЕ ТЕХНОЛОГИИ И ПОКРЫТИЯ"**

Подписные индексы по каталогам:

"Роспечать" – **85159**, "Пресса России" – **39269**, "Почта России" – **60252**.

*Подписку на журнал можно оформить с любого номера в любом отделении связи или непосредственно в издательстве по адресу:*

***Россия, 107076, Москва, Стромынский пер., д. 4,***

***ООО "Издательство Машиностроение"***

**Тел.: (499) 269-66-00 (отдел реализации), (499) 268-40-77 (редакция);**

**e-mail: realiz@mashin.ru, utp@mashin.ru**

УДК 621.778

**А.В. Щедрин** *(Технологический институт Московского государственного университета машиностроения (МАМИ))*,
**А.Ю. Козлов** *(ООО "МЗ "ТОНАР")*,
**Е.С. Сергеев** *(ОАО "НПП "Респиратор")*
*E-mail: t-5511@yandex.ru*

# Исследование технологических возможностей комбинированного инструмента для охватывающей обработки с параллельным сочетанием резания и деформирования

*Исследованы технологические возможности комбинированного инструмента для охватывающей обработки с параллельным сочетанием резания и холодного пластического деформирования в условиях применения металлоплакирующих смазок, реализующих фундаментальное научное открытие "эффект безызносности Гаркунова–Крагельского".*

***Ключевые слова:*** *охватывающая обработка, комбинированный инструмент, металлоплакирующая смазка, усилие обработки, качество обработки.*

*Research of technological capabilities of the combined tool for covering processing with a parallel combination of cutting and cold plastic deformation in the conditions of application of the metalplating greasings realizing a fundamental discovery "Effect bezyznosnosti Garkunova–Kragelsky" ("effect of zero wear").*

***Keywords:*** *covering processing, the combined tool, metalplating greasing, effort of processing, quality of processing.*

В работах [1–5] исследованы технологические возможности режущих, деформирующих и комбинированных инструментов (фильер) для охватывающей обработки сплошных и полых профилей методами волочения и редуцирования. При этом в работах [1–3] применительно к комбинированным инструментам исследовано последовательное сочетание предварительного холодного пластического деформирования и последующего резания.

Для исследования технологических возможностей охватывающей обработки на основе реализации комбинированного способа воздействия с параллельным сочетанием резания и деформирования с использованием алгоритмических процедур "систем искусственного технологического интеллекта" [6] был синтезирован соответствующий инструмент [7], экспериментальная конструкция которого представлена на рис. 1.

Комбинированная деформирующе-режущая фильера имеет режущий зуб с главными передним углом 10° и задним углом 2° , а также калибрующую ленточку шириной 3 мм и обратный конус с углом 5°. Задний угол 2° одновременно является углом рабочего конуса деформирующей части инструмента, имеющей калибрующую ленточку. Материал фильеры – быстрорежущая сталь марки Р6М5 (55 HRC).

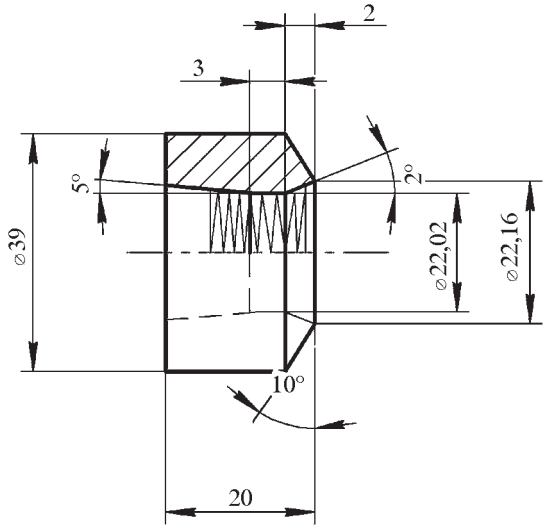



**Рис. 1. Конструкция экспериментальной фильеры для обработки с параллельной комбинацией резания и холодного пластического деформирования**

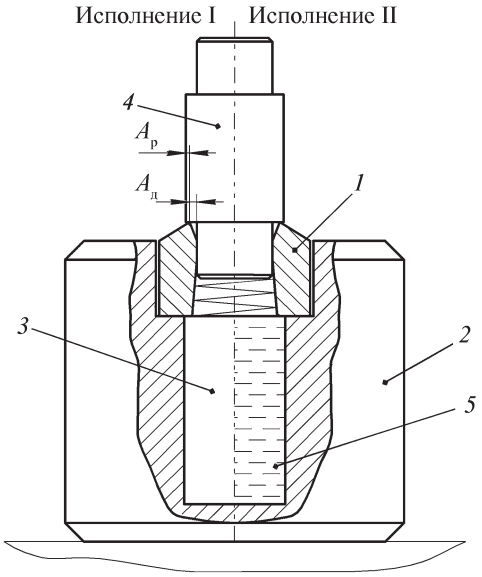



**Рис. 2. Экспериментальная установка для исследования охватывающей обработки методом редуцирования**

В соответствии с результатами работы [2] на поверхности канала фильеры выполнен регулярный микрорельеф в виде однозаходных винтовых канавок радиусом 1,5 мм, шагом 0,6 мм и глубиной на участке калибрующей ленточки от 5 до 6 мкм.

На рис. 2 представлена экспериментальная установка (исполнение I) для исследования технологических возможностей фильеры (см. рис. 1) на примере охватывающей обработки методом редуцирования. При этом фильера *1* устанавливается в обойму *2*, имеющую внутреннюю полость *3*. Обрабатываемая заготовка *4* проталкивается через рабочий канал фильеры *1* с суммарным припуском на радиус, состоящим из толщины срезаемого слоя $A_р$ и толщины деформированного слоя $A_д = 0{,}07$ мм. В качестве экспериментальных образцов-заготовок применялись цилиндрические штоки *4* (см. рис. 2) из латуни марки ЛС59-1 (126 НВ) с длиной обрабатываемой части 50 мм. Наружный диаметр обрабатываемой части варьировался таким образом, чтобы номинальная толщина срезаемого слоя до 0,3 мм варьировалась через интервал порядка 0,05 мм. Фактическая шероховатость поверхности обрабатываемой части образцов-заготовок после точения $Ra_з = 0{,}40...0{,}476$ мкм.

В качестве технологических смазок применялось минеральное масло марки И-40, а также его смесь с 10 % металлоплакирующей присадки "Валена" (пат. РФ № 2277579), реализующей фундаментальное научное открытие "эффект безызносности при трении Гаркунова–Крагельского" [4, 5]. Обработка осуществлялась на испытательной машине при скорости 0,05 м/мин.

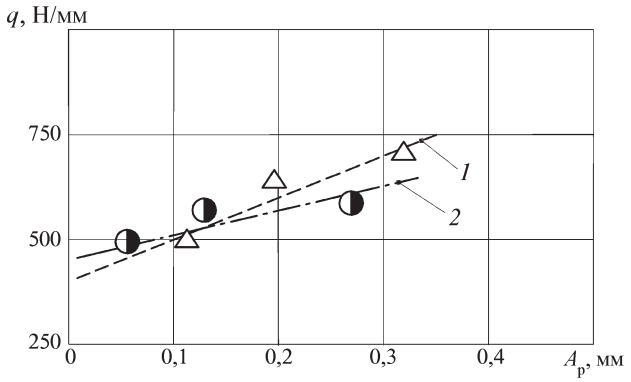



**Рис. 3. Зависимости удельного усилия обработки $q$ от фактической толщины срезаемого слоя $A_р$ и вида применяемой смазки:** *1* – минеральное масло; *2* – металлоплакирующая смазка

На рис. 3 представлены зависимости удельного усилия обработки от фактической толщины срезаемого слоя и вида применяемой смазки. Их анализ показывает, что при определенной толщине срезаемого слоя в условиях применения металлоплакирующей смазки возможно снижение энергозатрат на совместное резание и деформирование. По аналогии с работами [4, 5] снижение энергозатрат связано с образованием медной сервовитной пленки. Данные графические зависимости могут быть представлены аналитически в виде

$$\begin{aligned} q\,(0\,\%) &= 419{,}7 + 1001{,}66\ A_р\,; \\ q(10\,\%) &= 467{,}15 + 660{,}35\ A_р\,. \end{aligned} \qquad (1)$$

Совместный анализ выражений системы (1) показывает следующее: уменьшение усилия обработки в условиях применения металлоплакирующей смазки начинается при $A_р > 0{,}139$ мм; при $A_р = 0{,}3$ мм снижение усилия обработки составляет 7,6 %.

При объединении экспериментальных значений усилия обработки для обоих видов технологической смазки получим следующую аналитическую зависимость:

$$q\,(0\,\% + 10\,\%) = 442{,}23 + 861{,}4\ A_р\,. \qquad (2)$$

Свободный член выражения (2), соответствующий $A_р = 0$, характеризует среднее удельное усилие деформирования.

На рис. 4 представлены зависимости параметра шероховатости поверхности образцов-деталей от фактической толщины срезаемого слоя и вида технологической смазки. Практически неизменное значение параметра шероховатости $Ra_д$ во всем диапазоне изменения $A_р$ в условиях применения металлоплакирующей присадки объясняется образованием медной сервовитной пленки и локализацией в ней части пла-

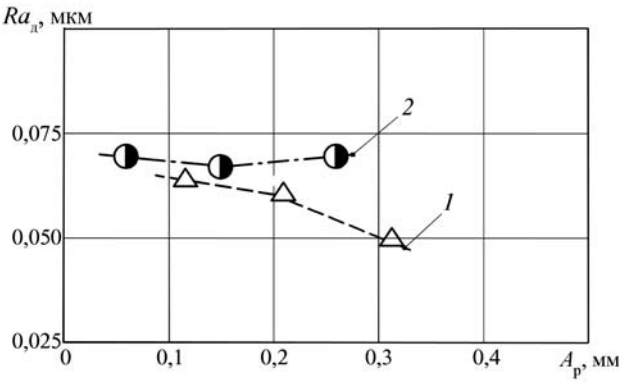



**Рис. 4. Зависимости параметра шероховатости поверхности образцов-деталей от фактической толщины срезаемого слоя и вида применяемой смазки:**
*1* – минеральное масло; *2* – металлоплакирующая смазка

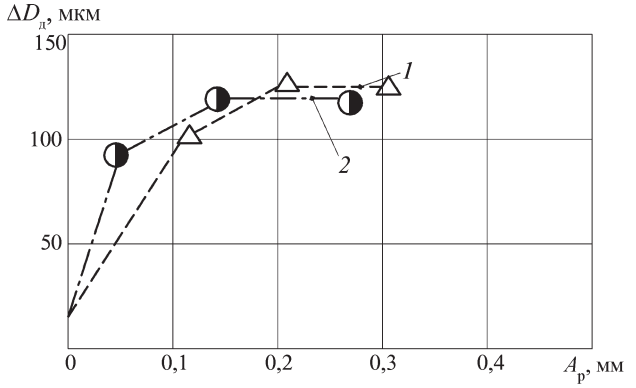



**Рис. 5. Зависимости поля рассеяния диаметра образцов-деталей ($\Delta D_д$) от фактической толщины срезаемого слоя и вида применяемой смазки:**
*1* – минеральное масло; *2* – металлоплакирующая смазка

стической деформации исходных микровыступов шероховатой поверхности образцов-заготовок.

Уменьшение шероховатости поверхности с увеличением $A_р$ при отсутствии металлоплакирующей присадки связано с граничным режимом трения, при котором происходит почти прямой контакт микровыступов регулярной микрогеометрии поверхности инструмента и микровыступов иррегулярной микрогеометрии микровыступов образцов-заготовок вследствие меньшей прочности слоя смазки из минерального масла.

На рис. 5 представлены зависимости поля рассеяния диаметра образцов-деталей от фактической толщины срезаемого слоя и вида технологической смазки. Их анализ показывает, что при $A_р > 0{,}175$ мм возможно улучшение размерной точности получаемых изделий в условиях реализации эффекта Гаркунова–Крагельского. Причем размерная точность (рис. 6) в большей степени определяется геометрической точностью в продольном сечении, а не геометрической точностью в поперечном сечении (овальностью), так как первое отклонение больше второго (рис. 7, 8).

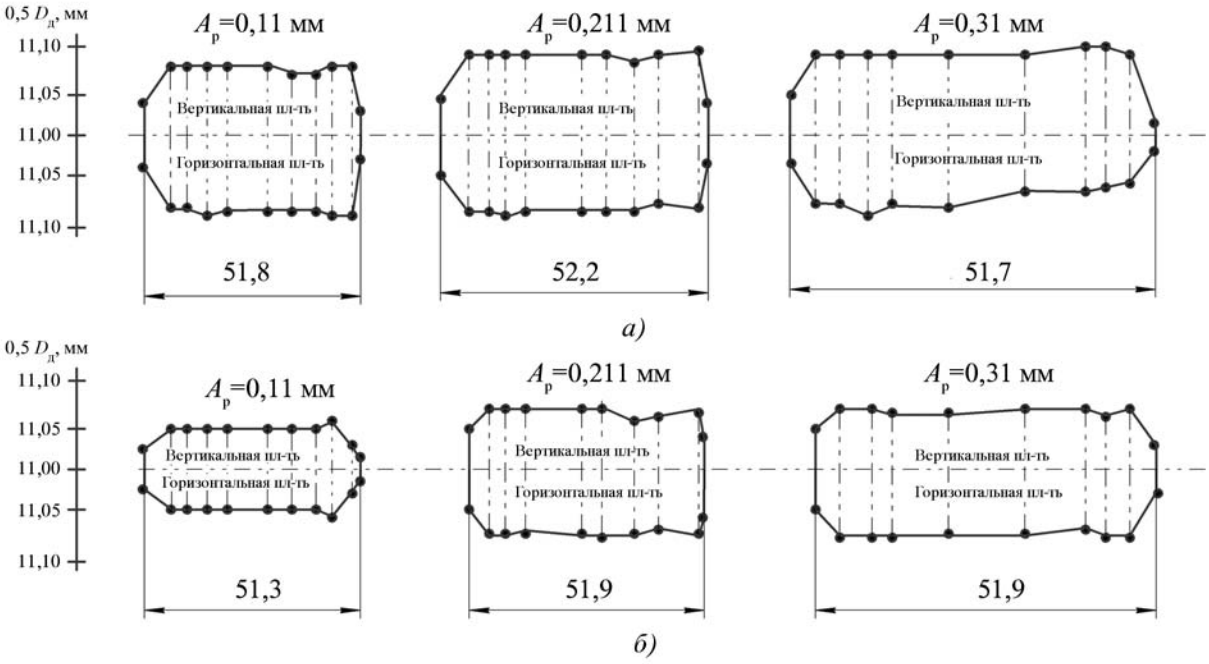



**Рис. 6. Графики размерной точности образцов-деталей:**
*а* – обработка в среде минерального масла; *б* – обработка в среде металлоплакирующей смазки

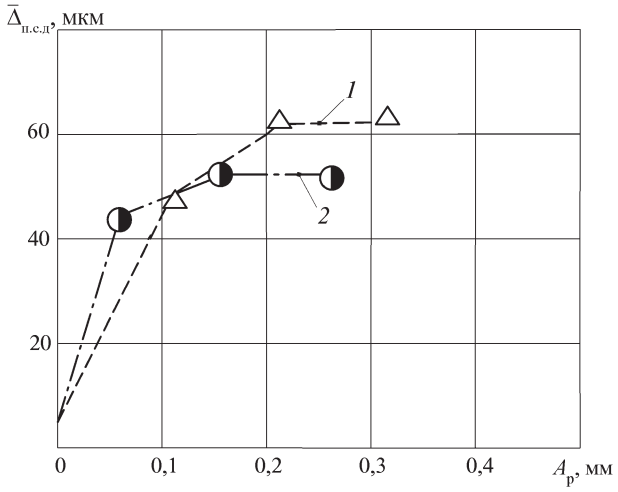



**Рис. 7. Зависимости среднего отклонения профиля продольного сечения образцов-деталей $\overline{\Delta}_{п.\,с.\,д}$ от фактической толщины срезаемого слоя и вида применяемой смазки:**
*1* – минеральное масло; *2* – металлоплакирующая смазка

Анализ зависимостей средней остаточной деформации поверхности образцов-деталей (рис. 9) показывает, что она имеет положительное значение и практически не зависит от вида применяемой смазки, но увеличивается с ростом фактической толщины срезаемого слоя. Дополнительно установлено, что при $A_р > 0{,}15$ мм образуется плохо разделенная и сильно деформированная кольцевая стружка (рис. 10), а процесс обработки характеризуется возрастающими вибрациями в технологической системе.

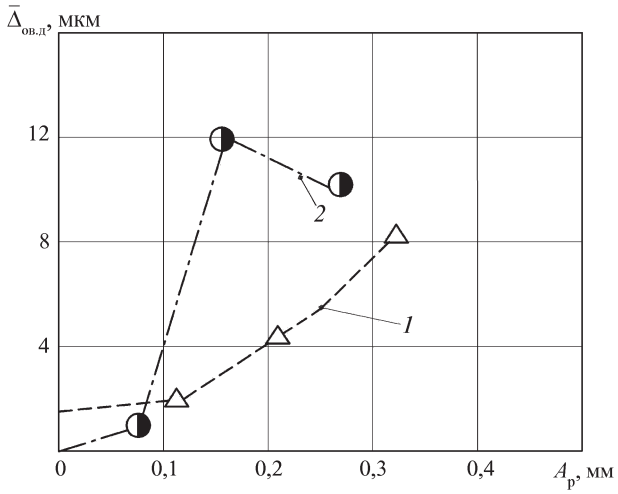



**Рис. 8. Зависимости средней овальности образцов-деталей $\overline{\Delta}_{ов.\,д}$ от фактической толщины срезаемого слоя и вида применяемой смазки:**
*1* – минеральное масло; *2* – металлоплакирующая смазка

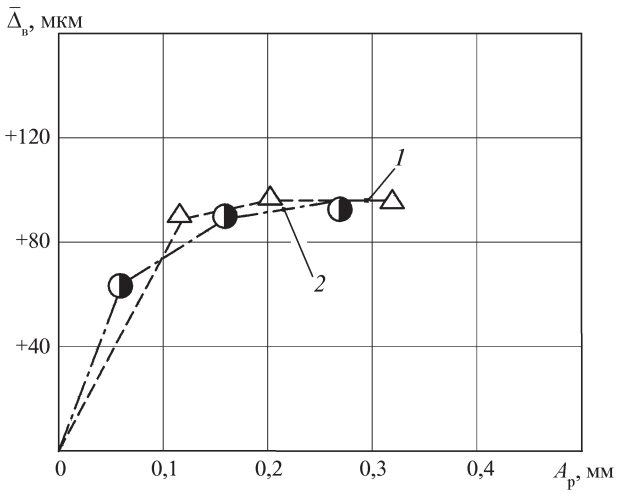



**Рис. 9. Зависимости средней остаточной деформации поверхности образцов-деталей от фактической толщины срезаемого слоя и вида применяемой смазки:**
*1* – минеральное масло; 2 – металлоплакирующая смазка

С учетом изложенного выше по аналогии с исследованием [3] перед фильерой (см. рис. 1) необходимо устанавливать деформирующую шариковую фильеру

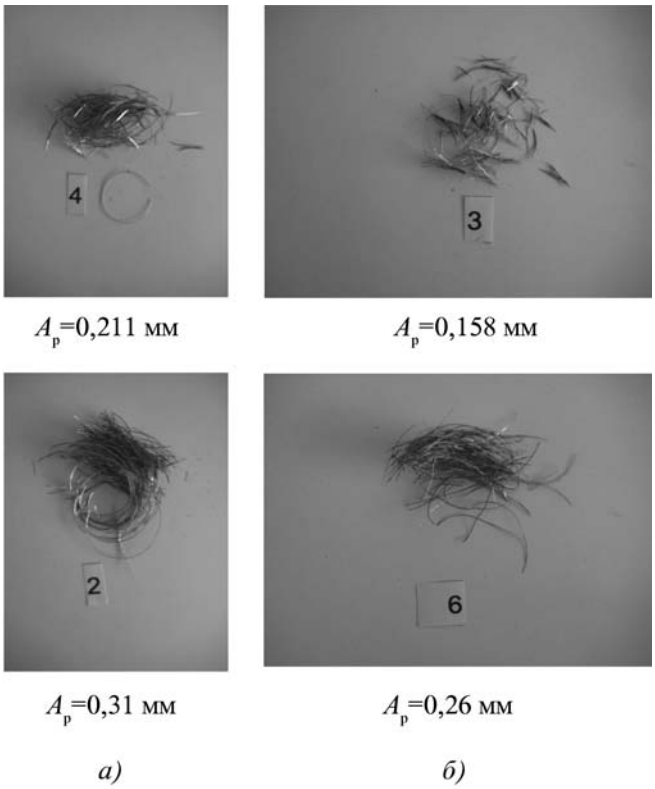



**Рис. 10. Виды стружки:**
*а* – обработка в среде минерального масла; *б* – обработка в среде металлоплакирующей смазки

[7, 8], которая будет формировать на заготовке продольные стружкоразделительные канавки, обеспечивающие образование разделенной стружки и существенно улучшающие процесс стружкообразования. Другое направление интенсификации – обработка в условиях самовозбуждаемого противодавления металлоплакирующих смазок *5* (см. рис. 2, исполнение II) по канавкам регулярного микрорельефа поверхности инструмента по аналогии с работой [5]. Таким образом, выполненные исследования позволяют сделать вывод о перспективности предложенного инновационного инструмента.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. **Щедрин А.В., Ульянов В.В., Скоромнов В.М. и др.** Совершенствование способа управления процессом стружкообразования в методах деформирующе-режущей обработки // Вестник машиностроения. 2005, № 12. С. 41–42.

2. **Щедрин А.В., Ульянов В.В., Скоромнов В.М. и др.** Повышение эффективности методов комбинированного волочения за счет регуляризации микрогеометрии рабочей поверхности инструмента // Вестник машиностроения. 2006. № 11. С. 58–60.

3. **Щедрин А.В., Сумеле Г.К. и др.** Влияние свойств обрабатываемого материала на характеристики комбинированного волочения длинномерных профилей // Вестник машиностроения. 2010. № 11. С. 74–76.

4. **Щедрин А.В., Гаркунов Д.Н., Мельников Э.Л. и др.** Расширение возможности комбинированного волочения инструментом с регулярной микрогеометрией путем применения металлоплакирующих присадок // Вестник машиностроения. 2011. № 4. С. 62–72.

5. **Гаврилов С.А., Щедрин А.В.** Совершенствование технологий применения металлоплакирующего кондиционера в методах комбинированной обработки // Вестник машиностроения. 2012. № 6. С. 75–78.

6. **Щедрин А.В., Ульянов В.В., Чихачёва Н.Ю. и др.** Трибология как фундаментальная основа системного проектирования конкурентоспособных технологических объектов // Ремонт, восстановление, модернизация. 2009. № 4. С. 15–20.

7. **Щедрин А.В., Ульянов В.В., Скоромнов В.М. и др.** Совершенствование комбинированных методов редуцирования и прошивания // Металлург. 2005. № 10. С. 66–69.

8. **Гаврилов С.А., Зинин М.А.** Применение эффекта безызносности при синтезе металлоплакирующих смазок для экстремальных условий трения // Заготовительное производство в машиностроении. 2013. № 2. С. 29–33.

ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ

**ОСНОВЫ ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

УЧЕБНИК **В.Ф. Безъязычный**

2013 г. Объем 568 с. Формат 60x88 1/16 Переплет ISBN 978-5-94275-669-7 Цена 1000 р.

Изложены основы технологии машиностроения в соответствии с программой учебного курса. Даны основные понятия и положения, основы базирования, основы проектирования технологических процессов, общие принципы обработки деталей, причины возникновения погрешностей при механической обработке. Приведены расчет режимов резания, методика выбора способа обработки деталей, основы технического нормирования, пути повышения производительности станочных операций. Показана последовательность проектирования технологических процессов сборки.

Для студентов вузов, обучающихся по направлению подготовки бакалавров и магистров «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств».

Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:

по почте: 107076, г. Москва, Стромынский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru

Дополнительная информация по телефонам: (499) 269-52-98, 269-66-00 и на сайте WWW.MASHIN.RU

УДК 67.017

**Д.А. Исаев, Е.А. Исаева, Е.В. Крутина**
*(Московский государственный машиностроительный университет (МАМИ))*
*E-mail: dlmon_demon@mail.ru*

# Анализ изготовления дисков газотурбинного двигателя

*Показано, что современный газотурбинный двигатель представляет собой сложную механическую систему. На него одновременно действуют газодинамические, тепловые и вибрационные нагрузки. Перспективные газотурбинные двигатели предполагают повышенные нагрузки на все ступени машины и, соответственно, на диски газотурбинных двигателей.*

***Ключевые слова:*** *газотурбинный двигатель (ГТД), диск ГТД, никелевый сплав, градиентная структура, зеренная переменная структура.*

*It is shown that a modern gas turbine engine is a complex mechanical system. It simultaneously operate gas-dynamic, thermal and vibration. Advanced gas turbine engines require higher load on all machines and steps, respectively, to the disks of gas turbine engines.*

***Keywords:*** *gas turbine engine GTEd, rive GTE, nickel alloy, the gradient ctructure, variable grain structure.*

## Введение

В настоящее время внимание производителей направлено на экономию дорогостоящих металлов, к которым относятся Ni, Ti, Al, Co, V, W и др. Как известно, при производстве *газотурбинных двигателей* (ГТД), устанавливаемых на самолетах ВВС, диски турбин изготавливаются из жаропрочных никелевых сплавов, например ЭП741НП. Этот сплав содержит около ≈60 % никеля, остальное – перечисленные выше металлы.

Масса заготовки диска 100...110 кг, диска – 12 кг. *Коэффициент использования металла* (КИМ) равен 0,1, т.е. до 90 % металла идет в стружку. При этом нерационально расходуется электроэнергия, изнашиваются станки и инструмент, а также привлекается большое количество обслуживающего персонала. Технология изготовления дисков для двигателей больших машин, которая применяется в настоящее время, позволяет поднять ресурс изделий до 1200... 1300 ч, после чего необходимо менять диск.

При проектировании и разработке сложнонагруженных и габаритных деталей турбины, таких как диски, к ним предъявляются требования высокой жаропрочности в области обода и одновременно высокого предела текучести в области ступицы, а также высокого сопротивления росту усталостной трещины как в области ступицы, так и обода.

Указанные проблемы могут быть решены путем организации работ по двум направлениям:

1. Создание заготовки диска с переменным по радиусу составом: в периферийной части заготовки состав должен соответствовать наиболее жаропрочному дисковому сплаву, а в ступичной части – наиболее прочному при невысоких (300...500 °С) температурах сплава. Эта технология трудно реализуема на практике.

2. Применение особой термической обработки, обеспечивающей в ободной части диска крупнозернистую структуру (имеющую более высокую жаропрочность), а в районе ступицы мелкозернистую структуру (позволяющую иметь более высокие кратковременные прочностные свойства) (рис. 1). Данная технология малозатратна и реализуема в достаточно короткий временной период.

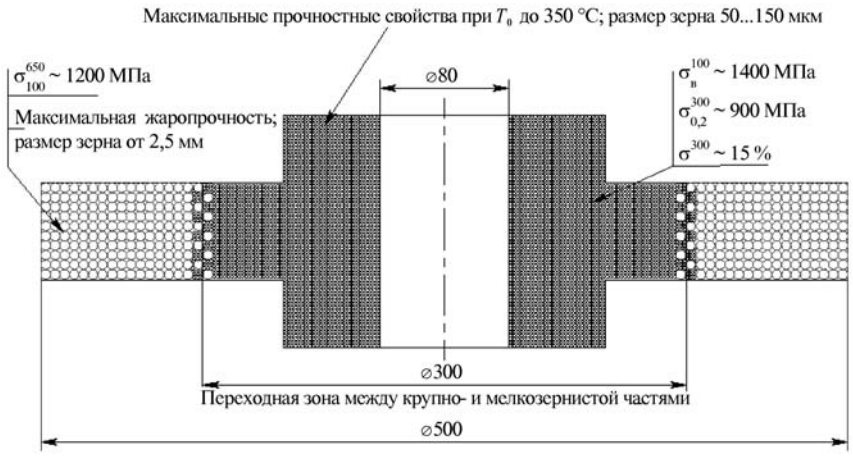



**Рис. 1. Сечение заготовки диска**

## Заготовки с переменным составом (биметаллический диск)

Указанные направления решения проблемы с 1980-х гг. активно развивалось в ВИЛС, ВИАМ, ОАО "Композит" и т.д.

В работе [1] представлены исследования переходной зоны между высоколегированным гранулированным сплавом и низколегированным литейным сплавом. Соединение было получено путем консолидации в капсуле при горячем изостатическом прессовании гранул высоколегированного сплава с низколегированным компактным образцом.

В образовавшейся при соединении переходной зоне отсутствуют частицы карбидов и интерметаллидов, способных привести к преждевременному разрушению. В переходной зоне наблюдается плавное изменение концентрации элементов при перемещении от одного сплава к другому.

Однако данный положительный результат возникает не всегда. Например, в переходной зоне между литейным сплавом ЖС6У и гранульным ЭП741НП наблюдается четкая граница, состоящая из сплошного каркаса крупных (до 5 мкм) выделений $\gamma'$-фазы (рис. 2).

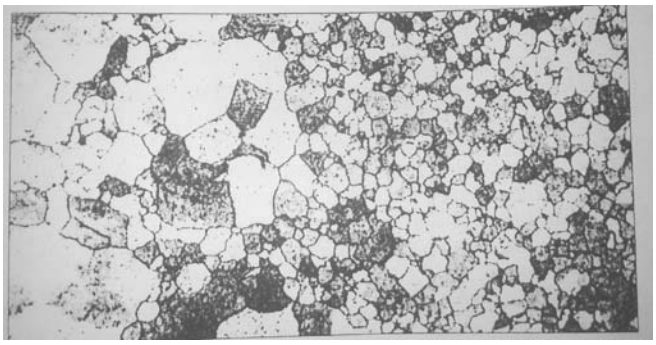


**Рис. 2. Микроструктура переходной зоны после термообработки**

Такая же ситуация наблюдается в переходной зоне между сплавами ЖС3ДК и ЭП741НП – в месте соединения наблюдается каркас из частиц $\gamma'$-фазы.

Обобщая полученные данные, можно сделать вывод, что поскольку структура и фазовый состав переходной зоны формируются диффузионным путем, они могут изменяться как в зависимости от режимов *горячего изостатического прессования* (ГИП) и термической обработки, так и в процессе высокотемпературной эксплуатации.

При предварительной оценке допустимых сочетаний сплавов необходимо учитывать диффузионные характеристики входящих в их состав элементов, оценивать структурные и фазовые изменения в переходной зоне и на основании выполненного анализа выдавать рекомендации. В настоящее время существуют методы анализа для предварительной оценки [2, 3].

Применяемые технологии термической обработки дисков ГТД обеспечивают одинаковые механические характеристики во всех его секциях. Поэтому требуемый уровень прочности монолитных деталей в различных частях получают за счет увеличения толщины диска в области ступицы, это приводит к увеличению веса, что нежелательно.

В последнее десятилетие в Китае применительно к дискам ГТД с использованием процесса быстрого лазерного формирования получены функционально-градиентные материалы, состав которых непрерывно изменяется от 100 % стали 316L до 100 % сплава Rene 88 DT. Микроструктура полученного материала полностью плотная и тонкодисперсная; химический состав и твердость непрерывно изменяются [4].

После анализа изложенного можно сделать вывод, что данные способы изготовления диска ГТД имеют следующие недостатки: высокую стоимость получения дисков из-за сложности процесса изготовления; проблему чистоты плоскости соединения при получении дисков из гранульного и литейного сплавов; напряжения в зоне соединения; несовместимость термообработок, так как используются разного рода сплавы.

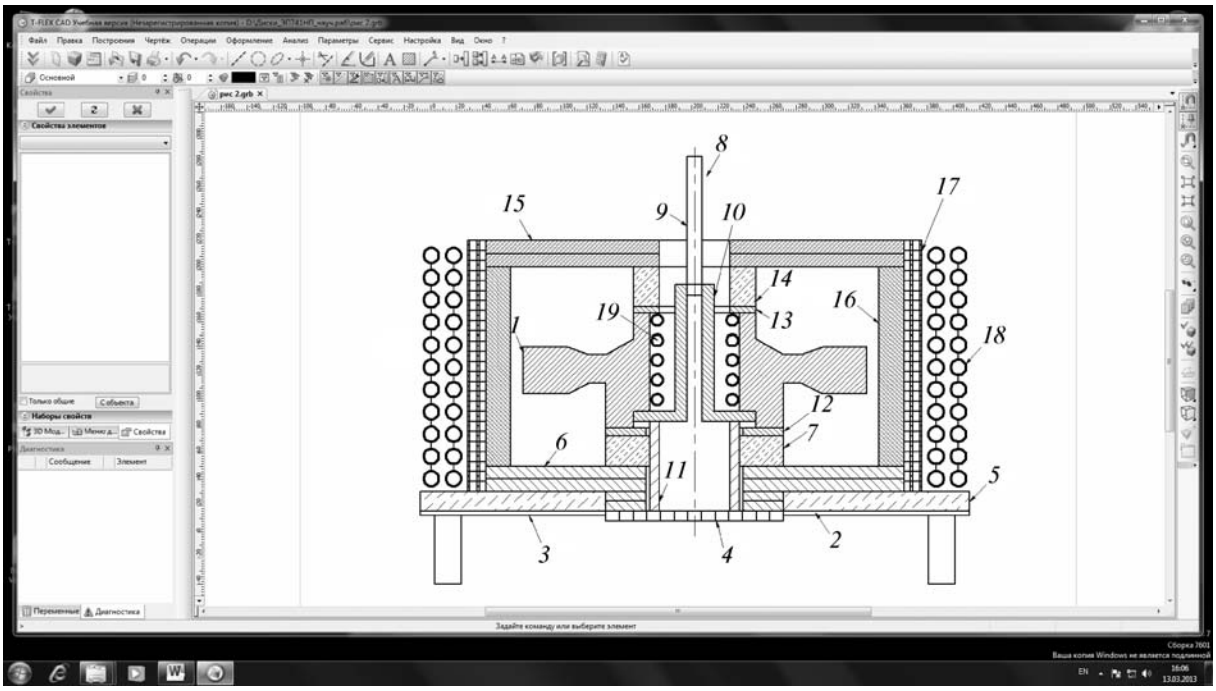



**Рис. 3. Схема установки фирмы UT:**
*1* – заготовка диска; *2*, *3* – фундамент; *4* – открытая решетка; *5* – слой изолирующего материала; *6* – слой жесткой графитовой обшивки; *7*, *14* – кольцевая термоизоляция fiberfax; *8* – сборка; *9* – поднимающийся стержень; *10* – опора диска; *11* – опорное кольцо; *12*, *13* – медный токоподвод для передачи энергии индуктору; *15* – слой жесткого графитового картона; *16* – проводящий материал; *17* – слой графитового войлока; *18* – внешняя индукционная катушка; *19* – охлаждаемая водой индукционная катушка

## Заготовки с градиентной зеренной структурой

С середины 1980-х гг. за рубежом начали проводить исследования и разработку технологий получения дисков, имеющих градиентную структуру, обеспечивающую различный уровень термомеханических характеристик монолитной детали в различных ее объемах. В России никаких работ в данном направлении не проводилось.

Гомогенизация выше $T_{\text{п.р}}\gamma'$ с последующей выдержкой при температуре ниже $T_{\text{п.р}}\gamma'$. Одна стадия старения обеспечивает стойкую к развитию усталостных трещин структуру укрупненного зерна.

Медленное охлаждение обода по сравнению со ступицей обеспечивает оптимальную комбинацию прочности и скорости роста усталостной трещины [5]. Фирмой UT отработана технология и запатентована установка для получения дисков с двойной микроструктурой [5].

На рис. 3 показано расположение заготовки диска *1* в запатентованной установке, имеющей фундамент *3* с открытой решеткой *4* в центре. На фундаменте расположен слой изолирующего материала *5*, на который укладывается слой жесткой графитовой обшивки *6*. На обшивку устанавливают дополнительную кольцевую изоляцию *7* из высокотемпературного волокнистого материала fiberfax.

Сборка *8* включает в себя поднимающий стержень *9*, опору диска *10* и опорное кольцо *11*, служащее для фиксации заготовки диска и обеспечения его охлаждения. Для передачи энергии индуктору используются медные токоподводы *12*, *13*.

Над верхними шунтами *13* также укладывается кольцевая термоизоляция fiberfax *14*, затем размещают дополнительный слой жесткого графитового картона *15*. Диск обертывается проводящим материалом *16*, который установлен на жестком графитовом слоистом картоне *6*. Вокруг токопроводящего материала *16* расположен в несколько слоев графитовый войлок *17*. Внешняя индукционная катушка *18* охлаждается водой, внутри диска *1* расположена другая, охлаждаемая водой, индукционная катушка *19*. Изолирующие материалы сверху и снизу диска снижают радиационные потери и температурные флуктуации во время термообработки.

Метод изготовления дисков, предложенный в патенте США [6], отличается высокой стоимостью из-за необходимости применения охлаждающего газа, наличия особых требований к подготовке диска, применения вакуума и индукционной катушки и, кроме того, метод позволяет производить только один диск.

Поэтому являются актуальными разработка и внедрение технологии изготовления дисков ГТД в промышленности России, снижение стоимости производства дисков, увеличение ресурса дисков в два и более раз, снижение массы ответственных деталей за счет новых конструкционных решений, повышение температуры газа перед турбиной на 110...150 °С, разработка технологии получения дисков ГТД с переменной зеренной структурой по сечению, размер зерна в котором в центральной ступичной части 100...150 мкм и 2,5...3,0 мм – в ободной части.

**БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК**

1. **Особенности** фазового состава и микроструктуры переходной зоны между составляющими сплавами в комбинированных заготовках из жаропрочных никелевых сплавов / Л.А. Правикова, Е.Н. Рудницкий, В.И. Еременко, О.А. Мозолевская. М., ВИЛС, 1991. С. 120–121.

2. **Логунов А.В., Логачев А.В., Логачева А.И.** Программное обеспечение при анализе и оценке фазового состава, несоответствия параметров кристаллических решеток гамма и гамма-штрих фаз, а также критических значений электронных вакансий в жаропрочных никелевых сплавов // Тр. 3-й Междунар. инжен.-техн. конф. "Металлдеформ–2009". 3–5 мая 2009 г. Самара. Т. 1. С. 100–109.

3. **Определение** коэффициентов диффузии легирующих элементов в жаропрочных никелевых сплавах / Н.А. Зайцев, А.В. Логунов, А.А. Шатульский, Ю.Н. Шмотин // Технология металлов. 2011. № 10. С. 38–46.

4. **Пат. 5547523 США**. Retained strain forging of Ni-base superalloys / C.P. Blankenship Jr. M.F. Henry, 1998.

5. **Fipphen I.S., Sparks R.B.** Using Differential Thermal Analysis to Determine Phase Change Temperatures. Met/ Prog. 1979. April. P. 56–59.

6. **Пат. 4820358 США.** Method of making high strength superalloy components with graded properties / K.M. Chang, 1995.

ИЗДАТЕЛЬСТВО МАШИНОСТРОЕНИЕ

**ЛАБОРАТОРНЫЕ И ПРАКТИЧЕСКИЕ РАБОТЫ ПО ТЕХНОЛОГИИ МАШИНОСТРОЕНИЯ**

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ **В.Ф. Безъязычный, В.В. Непомилуев, А.Н. Семенов и др.**

2013 г. Объем 600 с. Формат 60x88 1/16 Переплет ISBN 978-5-94275-697-0 Цена 1000 р.

В учебном пособии приведено содержание возможных лабораторных и практических работ по технологии машиностроения, в которых нашли отражение вопросы обеспечения и исследования точности обработки и качества поверхностного слоя обрабатываемых деталей, а также вопросы технологического обеспечения эксплуатационных свойств деталей машин.

Предназначено для студентов машиностроительных вузов, обучающихся по направлению «Конструкторско-технологическое обеспечение машиностроительных производств».

**Приобрести книгу в издательстве можно, прислав заявку:**

по почте: 107076, г. Москва, Стромынский пер., 4; по факсу: (499) 269-48-97; по e-mail: realiz@mashin.ru

Дополнительная информация по телефонам: (499) 269-52-98, 269-66-00 и на сайте WWW.MASHIN.RU

ООО "Издательство **Машиностроение**", 107076, Москва, Стромынский пер., 4.
Учредитель ООО "Издательство Машиностроение".
**E-mail: utp@mashin.ru. Web-site: www.mashin.ru.**
Телефоны редакции журнала: (499) 268-40-77, 269-54-96; факс: (499) 268-85-26, 269-48-97.
Дизайнер *Поджиботов К.Ю.* Технический редактор *Жиркина С.А.* Корректоры *Сажина Л.И., Сонюшкина Л.Е.*
Сдано в набор 03.03.14 г. Подписано в печать 21.04.14 г. Формат 60×88 1/8.
Бумага офсетная. Усл. печ. л. 5,88. Свободная цена.
Оригинал-макет и электронная версия подготовлены в ООО "Издательство Машиностроение".
Отпечатано в ООО "Белый ветер ", 115407, Нагатинская наб., д. 54, пом. 4