

КИЕВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

КОЖИНСЬКИ Мечислав

**ТЕХНОЛОГИЯ АЛМАЗНОГО ВЫГЛАЖИВАНИЯ
ДЕТАЛЕЙ С ХРОМОВЫМИ ПОКРЫТИЯМИ**

Специальность: 05.02.08 - технология машиностроения

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук**

Киев - 1995

ЛННБ України ім.В.Стефаніка



00779110 (P)

КИЕВСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ ИНСТИТУТ

На правах рукописи

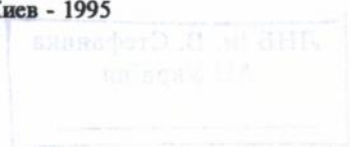
КОЖИНСЬКИ Мечислав

**ТЕХНОЛОГИЯ АЛМАЗНОГО ВЫГЛАЖИВАНИЯ
ДЕТАЛЕЙ С ХРОМОВЫМИ ПОКРЫТИЯМИ**

Специальность: 05.02.08 - технология машиностроения

**Автореферат
диссертации на соискание ученой степени
доктора технических наук**

Киев - 1995



Диссертация является рукописью

Работа выполнена в Киевском и Жешувском политехнических институтах.

- Научный консультант - доктор технических наук,
профессор Любимов В.Е.
- Официальные опоненты - доктор технических наук,
профессор Розенберг О.А.
- доктор технических наук,
профессор Бондаренко Л.И.
- доктор технических наук,
профессор Кухтик Т.В.

Ведущая организация - Украинский научно-исследовательский
институт авиационной технологии

Защита состоится _____ 1995 года в 15 часов, на заседании
специализированного Совета 201.02.09 по присуждению ченой степени
доктора технических наук при Киевском политехническом институте. Корп. 1
ауд. 214.

Адрес института: 252056, г. Киев-56, проспект Победы, 37. КПН.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Киевского политехнического
института.

Автореферат был разослан _____ 1995 г.

Отзывы на автореферат диссертации в двух экземплярах, заверенные гербовой
печатью организации, просим направлять в адрес Киевского политехнического
института ученому секретарю.

Ученый секретарь
специализированного Совета

доктор технических наук



Равская Н.С.

ЛНБ ім. В. Стефаника
АН України

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

Актуальность темы. Состояние знаний по обкатыванию покрытий нельзя считать достаточным. Среди работ на тему обработки обкатыванием, как и его применения для покрытий, даже не встречается тезиса о возможности улучшения свойств деталей с гальваническими покрытиями при их обкатывании. В общем, в публикациях редко встречаются описания попыток применения любой обработки покрытий. С практики известно, что помимо полирования хромовых покрытий, другая обработка вообще не используется.

Исследования возможности применения обкатывания покрытий и этим путем улучшения их свойств широко не проводятся, а публикации этой тематики немногочисленны. Практически все рассматривают эту проблему избирательно и фрагментарно и вообще это мелкие работы. Все содержащиеся в них рекомендации и выводы получены чисто экспериментально и можно отметить полнейшее отсутствие теоретического обоснования исследуемых вопросов, что является также следствием значительного уровня их сложности.

Эти замечания полностью относятся к проблеме обработки часто встречаемых в машинах деталей с хромовыми покрытиями. Такие покрытия значительно улучшают трибологические и антикоррозионные свойства деталей, но при этом настолько значительно ухудшают усталостные свойства, что в принципе не позволяют использовать хромированных элементов в условиях переменных нагрузок. О значительном ухудшении усталостных свойств деталей свидетельствуют не только конкретные, полученные ранее результаты исследований, но и также тот факт, что почти каждая в меру осторожно и соответственно проведенная обработка хромовых покрытий улучшает усталостные свойства элементов.

Если речь идет об обкатывании, то очевидно (малая толщина и очень большая твердость покрытий при небольшой твердости подложки), что обработка хромовых покрытий этим методом невозможна, кроме случая применения алмазного инструмента при небольшом его вжатии в поверхность обрабатываемой детали. Такой способ обработки хромовых покрытий - алмазное выглаживание (АВ) - является возможным и должен обеспечивать подобные результаты как и при выглаживании стали.

Несмотря на это, более широкого развития и комплексной разработке тема АВ в технической литературе не получила. Выполненная работа составляет попытку представления и решения важной научной проблемы, имеющей большое народнохозяйственное значение, а именно, теоретическое и экспериментальное обоснование алмазного выглаживания хромовых покрытий деталей. Следовательно, актуальность темы определяется важным значением предложенного метода обработки для производства.

Цель и задачи исследования. С точки зрения сущности процесса, протекающего в условиях пластических деформаций без увеличения температуры, учитывая одновременно его специфические особенности (малая сила обкатывания, небольшие области пластического деформирования, трение скольжения) можно допустить возможность применения АВ деталей с хромовыми покрытиями, и получение аналогичных эффектов как при выглаживании монометаллических элементов с получением верхнего слоя с улучшенными свойствами. Целью работы является увеличение усталостной прочности хромированных элементов.

Поставленная цель реализуется путем решения комплекса следующих задач:

1. Исследование сущности физико-механических явлений алмазного выглаживания, а именно, раскрытие механизма возникновения деформаций верхнего слоя материала в специфических условиях обработки и опираясь на теорию упругости и пластичности, четкое определение условий, в которых применение АВ было бы технически и экономически обосновано, а также экспериментальное обоснование обработки хромовых покрытий.

2. Путем теоретического анализа и исследований разработанных моделей, получение оптимальных условий протекания процесса чистового АВ хромовых покрытий деталей, установление их достоверности, проведение оптимизации параметров.

3. Установление взаимозависимости между отдельными, действующими в процессе АВ факторами, в виде формул, позволяющих выполнять аналитические расчеты режимов обработки покрытий и экспериментальную их проверку.

4. Исследование влияния алмазного выглаживания на состояние верхнего слоя покрытий путем сравнения основных показателей этого состояния в покрытиях, обработанных АВ, полированных и не обработанных.

5. Установление влияния метода обработки хромовых покрытий на эксплуатационные свойства деталей, определение влияния АВ на отдельные свойства и выявление зависимости между их изменениями и состоянием верхнего слоя, а также обоснование технических возможностей алмазного выглаживания деталей с хромовыми покрытиями.

Объектом исследования является процесс АВ хромовых покрытий деталей, наносимых на подложку со стали с малой или средней твердостью.

Научная новизна работы заключается в разработке нового теоретического подхода исследования метода АВ хромовых покрытий, нанесенных на стальную подложку и состоит в следующем:

1. Построена новая расчетная модель процесса АВ, учитывающая не только физико-механические свойства обрабатываемого материала и инструмента, но также стереометрию обрабатываемой поверхности.

2. Доказано теоретически и экспериментально существование оптимальных значений силы и подачи при АВ. Разработаны новые методы расчета режимов АВ хромовых покрытий деталей, теоретически выведена формула для расчета оптимального значения силы дожатия инструмента до обрабатываемой поверхности в зависимости от исходной шероховатости поверхности, разработаны также рекомендации для выбора других параметров этой обработки.

3. Поставлена принципиально новая задача оптимизации процесса АВ с критерием оптимизации - минимальной шероховатостью поверхности, предложены эффективные методы практической реализации ее решения, разработаны рекомендации, направленные на повышение эффективности такой обработки.

4. Определено влияние АВ на состояние поверхностного слоя и эксплуатационные свойства деталей с хромовым покрытием с применением оригинальной методики исследований при широком использовании компьютерной техники.

5. Определено влияние параметров состояния поверхностного слоя на эксплуатационные свойства деталей, а также показано возможности их формирования методом АВ хромовых покрытий.

Достоверность основных научных положений и полученных результатов обеспечивается физической обоснованностью и адекватностью построенных моделей процесса АВ, экспериментальной проверкой основополагающих предположений, корректностью постановки задачи, согласованностью полученных результатов с данными обработки реальных деталей.

Практическая ценность. Разработанные методы расчета режимов алмазного выглаживания и определение состояния поверхностного слоя хромового покрытия достаточно эффективно реализуются в инженерной практике, причем позволяют обоснованно учитывать влияние отдельных элементов режимов выглаживания на величину шероховатости поверхности хромового покрытия. Получены также формулы и рекомендации для подбора режимов алмазного выглаживания хромовых покрытий. Полученные результаты работы рекомендованы к применению в производстве для получения высоких эксплуатационных свойств деталей с хромовыми покрытиями.

На защиту выносятся:

1. Разработка принципиально новой модели процесса АВ деталей с хромовыми покрытиями, рассматривающая деформацию клинов микронеровностей поверхностей, которая определяет величину пластической деформации вершин микронеровностей обрабатываемой поверхности в зависимости от свойств обрабатываемого материала, материала инструмента и его геометрии, а также стереометрии обрабатываемой поверхности.

2. Теоретическое обоснование процесса АВ деталей машин с хромовыми покрытиями, его оптимизацию, расчет режимов обработки, выведенные зависимости между отдельными параметрами процесса и свойствами обрабатываемой поверхности, а также полученные связи между основными параметрами состояния поверхностного слоя и последующими эксплуатационными свойствами.

3. Методику проведения экспериментальных исследований с применением компьютерной техники, подтверждающих выполненные теоретические разработки.

4. Конструкции специального станка (патент ПНР № 150914, 1991 г.) и эксцентрикового патрона (патент ПНР № 150982, 1991 г.) для АВ торцов поверхностного упрочненных втулок.

Апробация работы. Полученные результаты докладывались на конференциях "Производство элементов машин с материалов со специальными свойствами" (Жешув, 1985), "Технология обработки обкатыванием". (Быдгощ 1988), семинарах "Усталость и механика расстрескивания материалов и конструкций" (Быстре, 1988), "Избранные проблемы инженерии поверхности" (Жешув, Быстре, 1992).

Диссертационная работа в целом обсуждалась на заседаниях кафедр технологии машиностроения Киевского и Жешувского политехнических институтов.

Публикации. Основные результаты работы опубликованы в 26 статьях, и 2 патентах.

Объем работы. Диссертационная работа состоит из введения трех разделов, выводов и списка литературы. Она изложена на 207 страницах машинописного текста и содержит 19 таблиц, 84 рисунков и список литературы из 113 наименований.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ ДИССЕРТАЦИИ

В первом разделе работы, на основе анализа литературных источников описан процесс хромирования, свойства хромовых покрытий, эксплуатационные свойства хромированных деталей, а также технологические способы их механической обработки. Показано, что обкатывание таких покрытий является проблемой недостаточно изученной, хотя его потенциальные возможности достаточно высоки и неполностью используемы.

Известно, что хромовые покрытия в значительной степени повышают такие свойства как износостойкость, жаро и коррозионную стойкость. Одновременно известным является их отрицательное влияние на усталостную прочность

в области упруго-пластических и упругих деформаций, а также на фреттинг усталость. Основными причинами некоторого ухудшения указанных свойств можно считать наличие в хромовом покрытии значительных растягивающих напряжений, насыщение водородом стальной подложки, увеличение ее хрупкости, увеличение шероховатости поверхности после хромирования а также влияние надреза, которым является (во время растягивания) покрытие относительно подложки.

В большинстве публикаций предварительные напряжения считаются главной причиной понижения усталостной прочности хромового покрытия. Напряжения растяжения покрытия приводят к увеличению значения среднего напряжения цикла и последующей концентрации на дне трещины, что способствует ускоренному появлению и распространению усталостных трещин подложки. Уменьшение величины растягивающих напряжений в покрытии и подложке впоследствии должно привести к улучшению усталостной прочности. Однако, достигнуто это должно быть методами, не ухудшающими иных показателей, влияющих на усталостную прочность, таких как шероховатость поверхности и пористость.

Еще более эффективно появление в покрытии сжимающих напряжений, поскольку при работе в условиях циклических нагрузжений, внешние напряжения суммируются с существующими. Доказано, что для монометаллических элементов приращение усталостной прочности пропорционально перемещению середины цикла в сторону сжимающих напряжений. В случае элементов с покрытиями можно ожидать аналогичных эффектов, тем более, что первые испытания в этом направлении были сделаны. Получено более высокую усталостную прочность хромированных образцов, в которых подложка и покрытие подверглись обкатке роликами, по сравнению с образцами которые не обкатывались, что объяснимо прежде всего наличием сжимающих напряжений.

Доказано также, что поскольку обработка поверхности под хромирование не создает каких - либо проблем и осуществима, как обычными методами, так и обкатыванием, обработка хромовых покрытий является специфическим вопросом. Относительно малая толщина хромовых покрытий при большой их твердости и хрупкости приводит к усложнению их дальнейшей обработки если она необходима. Чаще всего она применяется для уменьшения шероховатости поверхности, получения необходимой точности размеров и формы, достижения соответственно упорядоченной структуры или увеличения пористости. Наиболее распространенным методом обработки хромовых покрытий является полирование с помощью абразивных лент. Позволяет оно получать поверхности с малой шероховатостью но кроме простоты метод не имеет больших преимуществ. Из-за более высоких стоимости и требуемого уровня технического

оснащения, реже применяются такие методы обработки покрытий, как отделочное шлифование, хонингование, притирка, суперфиниш, абразивно-струйная обработка, пневмошариковый наклеп, обкатка роликами. Проводимые попытки применения обкатывания оказываются эффективными лишь при обработке подложки, твердость которой не выше 40 HRC, но обкатывание хромовых покрытий деталей создает так много проблем (подбор режимов обработки, растрескивание и шелушение покрытий, отслоения), что его применение считается невозможным. Однако результаты малочисленных исследований в этом направлении дают очень обнадеживающие результаты. Так при напорном обкатывании шариками или роликами можно в хромовом покрытии получить сжимающие напряжения, шероховатость поверхности даже $R_a < 0,16$ мкм, приращение микротвердости на 13%, повышение износостойкости около 14% и более чем двухкратное улучшение усталостной прочности. Эти данные четко подтверждают возможность целевого применения обкатывания хромовых покрытий. На основе детального анализа характерных особенностей возможных методов обкатывания, можно утверждать, что наиболее подходящим и в общем единственно возможным методом обкатывания хромовых покрытий является алмазное выглаживание. Однако большинство исследований по применению АВ относится к монометаллическим материалам, а относительно его применения для обработки покрытий встречаются лишь упоминания.

Алмазное выглаживание относится к методам статического обкатывания, т.е. такого, при котором контакт инструмента с обрабатываемой деталью является постоянным, а сила обкатывания (сила дожима инструмента до детали) действует статически и имеет постоянную величину. Хотя кинематически АВ выполняется подобно, оно имеет целый ряд специфических особенностей, существенно отличающих его от обкатки шариками и роликами и др. То, что во время АВ наконечник инструмента не катится, а скользит по обрабатываемой поверхности, приводит к необходимости применения инструментов с рабочими исполнительными поверхностями, выполненными из материала с небольшим коэффициентом трения скольжения. Таким материалом является алмаз с которого и делаются инструменты для АВ. Алмазные инструменты имеют относительно малые размеры и значительно большую твердость, чем обрабатываемые металлы. При малых размерах инструментов, поверхность их соприкосновения с обрабатываемой деталью является также малой и поэтому для получения местной пластической деформации не требуется большое усилие обкатывания.

В типовых условиях (обработка на токарном станке) АВ выполняется со следующими режимами: сила дожатия инструмента 50-250 Н, радиус закругления инструмента 1-4 мм, подача инструмента 0,02-0,15 мм/об, окружная скорость 0,5-1,5 м/с.

Однако, поданные пределы изменения режимов АВ достаточно широки, а необходимость их более точного определения для конкретных условий обработки делает их мало пригодными в практике, особенно когда условия обработки отличаются от условий проведения экспериментов. Наилучшим способом подбора режимов обработки является опытный, хорошо для этой цели подходит различные упрощенные методы оптимизации, так как для данного обрабатываемого материала и предыдущей обработки, остается оптимизировать только три или четыре входные переменные параметра. Наиболее выгодным способом определения параметров обработки считается расчет их значений на основе зависимостей, учитывающих влияние всех факторов существенно формирующих результаты процесса. В случае АВ до настоящего времени в технической литературе отсутствуют результаты анализа этого процесса на столько широкие, чтобы можно было получать такие зависимости.

По поводу применяемых малых величин подач, АВ характеризуется малой производительностью. Для ее увеличения можно иногда применять одновременную обработку несколькими инструментами либо обработку на высокооборотных станках со скоростями до 2,5 м/с.

Скорость обкатывания с экономической точки зрения должна быть подобрана возможно большей. Хотя применяемые для обкатывания инструменты могут успешно работать на скоростях до 2,5 м/с, но из-за технических ограничений большинства станков, скорость обкатывания составляет около 1 м/с. Ограничением является также точность системы СПИД, которая в решающий способ влияет на величину радиального биения обрабатываемой детали, что в свою очередь ограничивает допустимую скорость вращения.

Также с экономической точки зрения обработку деталей АВ следует выполнять во время только одного прохода. При правильно подобранных параметрах обработки увеличение числа проходов не приводит к значительному улучшению качества обкатываемой поверхности, а подчас может и его ухудшить.

Остальные, не оговоренные выше, условия обработки оказывают незначительное влияние на результаты процесса, когда они правильно установлены.

Среди небольшого числа работ и публикаций по вопросу АВ, большинство из них посвящено исследованиям влияния параметров обработки на упрочнение и шероховатость поверхности. В некоторых из них исследовано влияние обкатывания на эксплуатационные свойства, а физико-механические вопросы этого процесса рассматриваются эпизодически и очень фрагментарно. Тем не менее можно утверждать, что состояние верхнего слоя, полученного при АВ подобно как после других методов обкатывания. После АВ отмечается повышение твердости приповерхностных слоев, улучшение шероховатости поверхности

и наличие сжимающих напряжений. По сравнению с традиционными методами отделочной обработки (шлифование, полирование), проводимой в типичных условиях, после АВ можно ожидать лучших эксплуатационных свойств обрабатываемых деталей. Итак, после АВ достигается повышение усталостной прочности при упруго-пластической и упругой деформациях в сравнении с традиционными методами отделочной обработки. Одновременно при этом улучшаются и другие эксплуатационные свойства, например сопротивление трибологическому износу и долговечность элементов машин работающих в условиях контактной усталости а также усталостная прочность и коррозионному износу элементов работающих в коррозионной среде.

Относительно возможности реализации процесса АВ хромовых покрытий, на основе литературы установлено, что указанный метод в силу своей специфики делает возможной обработку деталей даже с очень тонкими и твердыми покрытиями без их отслоения от подложки, растрескивания или шелушения. Одновременно из литературных источников и многих выполненных автором исследований следует, что АВ является одним из наиболее эффективных методов обработки высокотвердых сталей. Поэтому следует ожидать, что так же высокоэффективной должна быть обработка хромированных покрытий, которые отличаются очень большой твердостью. При АВ можно получать шероховатость поверхности покрытия даже $R_a = 0,02$ мкм, т.е. такую как после тщательного полирования. Эта обработка позволяет также уменьшить волнистость поверхности. Микротвердость хромовых покрытий может возрасти даже на 20% в зависимости от режимов обработки. После АВ отмечается наличие сжимающих напряжений, которые распространяются не только на покрытие, но и также на определенную глубину подложки. Величина таких напряжений может доходить даже до 1200 МПа. Алмазное выглаживание хромовых покрытий улучшает их плотность, а также и иные эксплуатационные свойства.

Установлено также, что АВ подложки в несколько раз повышает сопротивление отслоению покрытий при сгибанию на прессе в сравнении с полированием. АВ хромового покрытия также обеспечивает трехкратное увеличение усталостной прочности стали 30ХГСН2А и похоже стали 38ХА в сравнении с необработанным покрытием.

Согласно данным некоторых литературных источников АВ хромовых покрытий улучшает их износостойкость на 25-30% в сравнении с полированием. В иных источниках отмечается возможность улучшения на 15%.

Приведенные результаты немногочисленных исследований, отраженных в технической литературе, очень многообещающие. Несмотря на их небольшое число, удается отметить достаточно большую количественную разницу между полученными результатами. Объяснимо это, очевидно, тем, что эти исследования

были очень фрагментными, проводились в различных условиях и для разных материалов подложки и хромовых покрытий, имеющих различную толщину и твердость. В некоторых публикациях не приведены даже исходные данные при исследованиях (например, толщина и твердость покрытия), делающих невозможным контроль опытов через их простое повторение. В большинстве случаев авторы за точку отсчета при сравнении полученных свойств принимают как уровень сравнения состояние очень редко встречаемое в практике, например, хромирование без дальнейшей обработки либо только шлифование покрытий, а не их полирование, что очевидно значительно увеличивает полученные эффекты. Но если их сравнивать с полученными при полировании покрытий, то оказывается, что они незначительные. Большинство исследований также проводится на покрытиях толщиной более 0,2 мм, что очевидно упрощает проведение обработки, исследований и измерений полученных свойств, хотя такие покрытия весьма редко применяются в производственной практике, что существенно понижает практическую ценность выполненных исследований.

В некоторых публикациях можно также встретить рекомендации относительно подбора режимов АВ хромовых покрытий исходя из результатов опытов. К сожалению, рекомендуемые пределы параметров настолько широкие, что в практике могут быть лишь использованы только для предварительного подбора, уточненного потом опытным путем. Почти что в каждой доступной работе отсутствует обоснование приводимых рекомендаций, которые к тому же существенно отличаются между собой.

В конце первой части работы помещены выводы, вытекающие из анализа литературных источников. Указывают они на то, что необходима работа, в которой были бы исследованы физико-механическая модель процесса АВ, комплексная проблема влияния АВ на состояние верхнего слоя и эксплуатационные свойства деталей с хромовыми покрытиями, а также связывающая результаты теоретических основ этого процесса с экспериментальными исследованиями. Также сформулированы цель и задачи исследования.

Во втором разделе работы проведены теоретический анализ процесса АВ хромовых покрытий, экспериментальные исследования доказывающие правильность теоретических выводов и экспериментальная оптимизация процесса выглаживания.

Сначала рассмотрена модель процесса АВ, в основу которой положено нагружение упруго-пластического полупространства сосредоточенной силой без учета шероховатости нагружаемой поверхности (задача Буссинеска). После анализа установлено, что эта модель не может быть использована для исследования АВ.

В дальнейшем, на основе анализа зоны стыка сферического наконечника инструмента с поверхностью обрабатываемой детали обнаружено, что существует теоретически обоснованная оптимальная величина подачи инструмента при АВ, зависящая от геометрии инструмента и свойств обрабатываемого материала определенной зависимостью

$$s = \sqrt{\frac{8R}{h_{sp}}} \quad (1)$$

где: R - радиус закругления наконечника инструмента, h_{sp} - величина упругих деформаций обрабатываемого материала.

Теоретически обосновано также существование оптимального значения вжатия инструмента, которое при чистовом АВ должно быть близким к высоте неровностей обрабатываемой поверхности.

В этой части работы помещен также материал по исследованию модели процесса АВ покрытий. В таких исследованиях также рассматриваются вопросы нагружения упруго-пластического полупространства сосредоточенной силой, либо посредством стального шарика (задача Герца). Чисто теоретические решения этих задач, как и их модификации, учитывающие специфику анализированных методов обкатывания, дают возможность получить зависимость между силой а глубиной пластических деформаций и свойствами материала в виде

$$g = c \sqrt{\frac{P}{R_e}} \quad (2)$$

где P - сила дожатия инструмента до выглаживаемой поверхности; g - глубина пластических деформаций; R_e - предел текучести материала; c - постоянная, зависящая от остальных не указанных факторов ($c = 0,13 \pm 0,54$).

Максимум приведенных напряжений имеет место на определенной глубине обрабатываемой поверхности. Там же происходит превышение предела пластичности материала, а по мере увеличения нагружающей силы область пластической деформации также растет.

Такая модель упруго-пластических деформаций является адекватной исследуемому процессу и достаточно точной для описания явлений происходящих при упрочняющем обкатывании, которое протекает при больших силе и глубине деформации материала. В этом случае на основании формулы (2) можно определять силу дожима инструмента в зависимости от требуемой

глубины упрочнения при известных механических свойствах обрабатываемого материала с достаточной точностью, а проблемы, связанные с состоянием поверхности могут не рассматриваться без большого ущерба.

Однако, для описания АВ, которое является чистовой обработкой, предложенная модель не пригодна. Полученные расчетные величины силы обкатывания, значительно отличаются от величин экспериментальных. Разница эта настолько большая, что полностью исключает возможность использования как задачи Буссинеска, так и Герца для анализа процесса АВ. Главной причиной этого является факт, что не учитывают они шероховатости поверхности перед обкатыванием, которая, как это показали исследования, является фактором существенно влияющим на результаты обработки. Поэтому, при анализе процесса алмазного выглаживания более удачной является модель, в которой рассматривается зависимость величины параметров (прежде всего силы обкатывания) не от требуемой глубины упрочнения, а от необходимой шероховатости обработанной поверхности.

Разработку обобщенной модели процесса АВ, определяющей влияние параметров реализации процесса на получаемый эффект (в этом случае на шероховатость поверхности после обкатывания), можно выполнить косвенным образом. Возможно определение оптимальной величины вжатия инструмента, а затем и зависимости, отражающей влияние отдельных параметров обкатывания и свойств обрабатываемого материала на величину этого вжатия. В этом собственно направлении и проведен анализ процесса. До анализа принята схема, показанная на рис. 1, в которой наступает смятие вершин микронеровностей поверхности нормальной силой, приложенной к вершине микронеровности. Силой трения можно пренебречь из-за малого коэффициента трения скольжения по металлах материалов инструментов для АВ. Например, коэффициент трения алмаза по стали составляет 0,02-0,08, а применение смазывания во время обработки машинным маслом еще более улучшает условия трения.

В произвольной точке С на расстоянии r от места приложения силы P_n , действующей на вершину неровности поверхности наступает сжатие, которое является тем меньшим, чем дальше от вершины неровности находится эта точка. Задачу можно рассматривать как плоскую, поскольку характер микронеровностей поверхности в перпендикулярном

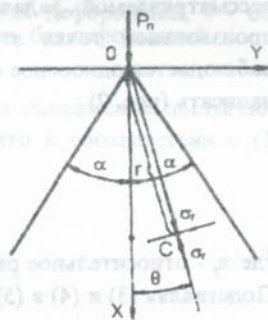


Рис. 1. Распределение напряжений в произвольной точке С под поверхностью клина нагруженного нормальной силой Р

к плоскости XOY направлении для типовых поверхностей, обработанных предварительно шлифованием, позволяет принять такое упрощение. Затем в такой схеме, как показано на рис. 1, можно использовать зависимости известные из сопротивления материалов, для задачи нагружения клина сосредоточенной силой. Тогда напряжения

$$\sigma_r = \frac{2 P_n}{2\alpha + \sin 2\alpha} \frac{\cos \theta}{r} \quad (3)$$

где P_n - сила на единицу длины в Н/мм, приложенная в вершине неровности; 2α - средний угол вершины неровности.

С целью определения зависимости перемещений от напряжений можно использовать формулу, описывающую удельное удлинение в радиальном направлении

$$\epsilon_r = \frac{\partial u}{\partial r} \quad (4)$$

Согласно теории пластичности, в случае деформации в фазе нагружения, уравнения, описывающие пластическое состояние, не отличаются от уравнений, выведенных для нелинейного упругого тела, имеющего такой же график растяжения. Разница имеет место только при разгрузении. Согласно этому, для рассматриваемой задачи нагружения клина сосредоточенной силой, для произвольной точки этого клина, в которой в плоскости действия силы наблюдается одноосное сжатие, можно для области пластических деформаций написать (рис. 2)

$$\epsilon_r = \frac{\sigma_r - \sigma_{pl}^*}{E_1} \quad (5)$$

где ϵ_r - относительное радиальное укорочение.

Подставляя (3) и (4) в (5) после преобразований, можно получить

$$\frac{\partial u}{\partial r} = - \frac{\sigma_r - \sigma_{pl}^*}{E_1} = \frac{\sigma_{pl}^*}{E_1} - \frac{2P_n \cos \theta}{E_1(2\alpha + \sin 2\alpha)r}, \quad (6)$$

откуда после интегрирования формула для перемещения точек, лежащих на оси x, примет вид

$$u = \frac{\sigma_{pl}^0}{E_1} r - \frac{2P_n \ln r}{E_1(2\alpha + \sin 2\alpha)} + B \quad (7)$$

Распределение напряжений под поверхностью сдеформированного клина показано на рис. 3. Расстояние d_1 определяет положение точки на оси X , которая является границей между пластической и упругой областями, т.е. глубину

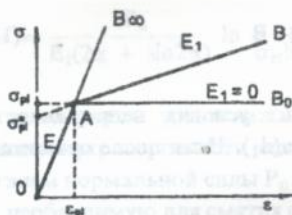


Рис. 2. График деформаций в функции напряжений при растяжении металлов

пластических деформаций. В этой точке приведенные напряжения достигают величины равной пределу текучести: $\sigma_r(d_1) = \sigma_{pl}$, что в соответствии с (3) позволяет написать

$$d_1 = \frac{2P_n}{\sigma_{pl}(2\alpha + \sin 2\alpha)} \quad (8)$$

Для определения перемещений в упругой области можно использовать уравнение (7), если вместо модуля упрочнения E_1 подставить модуль упругости E и исключить пластическую деформацию, т.е.

$$u_e = B_1 - \frac{2P_n \ln r}{E(2\alpha + \sin 2\alpha)} \quad (9)$$

где $r < d_1, d >$.

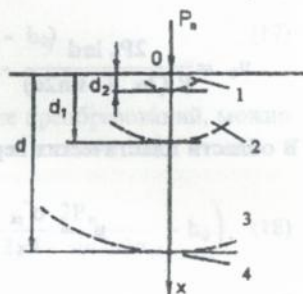


Рис. 3. Распределение напряжений в сдеформированном клине: 1 - область больших пластических деформаций, 2 - область малых пластических деформаций, 3 - область упругих деформаций, 4 - область без деформаций

Постоянную B_1 можно определить из условия, что для $r = d$ перемещение $u(d) = 0$ и после подстановки в уравнение (9)

$$B_1 = \frac{2P_n \ln d}{E_1(2\alpha + \sin 2\alpha)}, \quad (10)$$

откуда

$$u_e = \frac{2P_n \ln d}{E(2\alpha + \sin 2\alpha)} - \frac{2P_n \ln r}{E(2\alpha + \sin 2\alpha)} = \frac{2P_n}{E(2\alpha + \sin 2\alpha)} \ln \frac{d}{r} \quad (11)$$

В области пластических перемещений имеем

$$u = \frac{\sigma_{pl}^*}{E_1} r - \frac{2P_n \ln r}{E_1(2\alpha + \sin 2\alpha)} + B \quad (12)$$

Постоянная в уравнении (12) определяется из условия непрерывности перемещений на границе двух областей $u_e(d_1) = u(d_1)$. Итак после сравнения уравнений (11) и (12) получаем

$$\frac{2P_n}{E(2\alpha + \sin 2\alpha)} \ln \frac{d}{d_1} = \frac{\sigma_{pl}^*}{E_1} d_1 - \frac{2P_n}{E_1(2\alpha + \sin 2\alpha)} \ln d_1 + B \quad (13)$$

откуда:

$$B = \frac{2P_n}{E_1(2\alpha + \sin 2\alpha)} \ln d_1 + \frac{2P_n}{E(2\alpha + \sin 2\alpha)} \ln \frac{d}{d_1} - \frac{\sigma_{pl}^*}{E_1} d_1 \quad (14)$$

а после сгруппирования выражений

$$B = \frac{2P_n}{(2\alpha + \sin 2\alpha)} \left(\frac{1}{E_1} \ln d_1 + \frac{1}{E} \ln \frac{d}{d_1} \right) - \frac{\sigma_{pl}^*}{E_1} d_1 \quad (15)$$

Учитывая полученный результат в(7) и принимая, что $\sigma_{pl}^* \approx \sigma_{pl}$, получаем

$$u = \frac{2P_n}{(2\alpha + \sin 2\alpha)} \left(\frac{1}{E_1} \ln \frac{d_1}{r} + \frac{1}{E} \ln \frac{d}{d_1} \right) - \frac{\sigma_{pl}}{E_1} (d_1 - r) \quad (16)$$

В области больших пластических перемещений можно пренебречь упругой деформацией ($E \rightarrow \infty$) и рассматривать модель идеально жестко-пластического тела с упрочнением. Точкой, в которой наступит наибольшее перемещение является вершина микронеровности. Предполагая, что упругое перемещение этой точки (определяемое законом Герца) составляет h_0 , можно получить его величину

$$u = \frac{2P_n}{(2\alpha + \sin 2\alpha) E_1} \ln \frac{d_1}{h_0} - \frac{\sigma_{pl}}{E_1} (d_1 - h_0) \quad (17)$$

В то же время подставляя уравнение (8) в (17) после преобразований, можно получить

$$u = \frac{2P_n}{E_1(2\alpha + \sin 2\alpha)} \ln \frac{2P_n}{\sigma_{pl} h_0 (2\alpha + \sin 2\alpha)} - \frac{\sigma_{pl}}{E_1} \left(\frac{2P_n}{(2\alpha + \sin 2\alpha) \sigma_{pl}} - h_0 \right) \quad (18)$$

В полученном уравнении отражена зависимость между перемещением вершины микронеровности единичной длины с углом при ее вершине 2α под действием нормальной силы P_n . Фактор P_n в уравнении (18) представляет собой силу, необходимую для смятия одной неровности поверхности единичной длины на величину u . Учитывает он влияние не только нормальной силы, но и в явном либо неявном (h_0) виде влияние остальных условий АВ, т.е.

- свойства обрабатываемого материала (E, E_1, σ_{pl}, ν)
- свойства материала инструмента (E_d, ν_d),
- геометрии инструмента и кинематики процесса (R, s),
- стереометрии обрабатываемой поверхности (R_z, S_n, α).

Зависимость между силой обкатывания P и силой P_n можно представить в следующем виде

$$P = n l_1 P_n \quad (19)$$

где n - число микронеровностей поверхности одновременно соприкасающихся с инструментом; l_1 - средняя длина стыка инструмента с микронеровностями поверхности в направлении окружной скорости.

Поверхности, предназначенные под хромирование, являются предварительно шлифованными абразивными кругами либо полированными абразивными лентами. С точки зрения стереометрии поверхности оба эти метода обработки являются тождественными. Известно, что хромированное покрытие сохраняет стереометрические черты подложки. Шаг микронеровностей (S_n) такой поверхно-

сти составляет от 40 до 70 мкм, а при средней длине стыка инструмента (в направлении подачи) около 150 мкм, можно приблизительно определить величину коэффициента $n = 2 \div 4$, а принимая среднюю длину стыка инструмента с деталью в направлении окружной скорости тоже около 150 мкм, можно получить выражение для определения силы АВ

$$P = 0,5 P_n, \quad (20)$$

а после преобразования учитывая уравнение (18) и (20), можно получить формулу, описывающую влияние силы обкатывания (в том числе и раньше названных факторов) на величину перемещения вершин микронеровностей поверхности во время АВ, пригодную для хромистых покрытий, нанесенных на полированную или шлифованную подложку

$$u = \frac{4 P}{E_1(2\alpha + \sin 2\alpha)} \ln \left(\frac{4 P}{\sigma_{pl} h_0 (2\alpha + \sin 2\alpha)} - \frac{\sigma_{pl}}{E_1} \left(\frac{4 P}{(2\alpha + \sin 2\alpha) \sigma_{pl}} - h_0 \right) \right) \quad (21)$$

Используя уравнение (21), на компьютере были выполнены соответствующие расчеты и получены зависимости величины вжатия от силы выглаживания показывающие, что влияние логарифмического члена формулы (21) очень малое: кривая зависимости имеет очень малую кривизну. Поэтому без большой ошибки можно заменить кривую линию прямой, описываемой уравнением

$$u = 0,05 P - 0,5, \quad (22)$$

где: P - сила обкатывания (сила дожатия инструмента до обрабатываемой поверхности) в Н; u - величина вжатия инструмента в мкм (приблизительно она должна быть равной величине R_z обрабатываемой поверхности).

Учитывая изложенное и превращая соответственно формулу (22), можно получить

$$P = \frac{R_z + 0,5}{0,05}, \quad [N] \quad (23)$$

а после упрощения

$$P = 20 R_z + 10 \quad [N] \quad (24)$$

что описывает зависимость силы обкатывания от глубины вжатия инструмента.

Сила обкатывания, определенная по формуле (23), не учитывает влияния упрочнения обрабатываемого материала и изменения формы микронеровностей поверхности, полученной во время обработки. Поэтому расчетная величина силы выходит за пределы интервала оптимальных значений, полученных опытным путем.

Наблюдаемая разница возникает также вследствие принятых допущений при определении E_1 и свойств хромового покрытия. Причиной этого несоответствия может также быть приближенное, базирующееся на табличных данных, определение свойств хромовых покрытий, которые использовались для расчета. Учитывая указанные обстоятельства путем определения соответственного опытного поправочного коэффициента, возможно использование формул (21) и (24) для определения силы дожатия инструмента при чистовом АВ хромовых покрытий.

На основании выполненных теоретических исследований можно установить следующее:

- чистовое АВ не может быть смоделировано как процесс упруго-пластического деформирования полуповерхности посредством шарика. Его следует рассматривать как процесс деформирования малых клиньев - неровности обрабатываемой поверхности. Поэтому невозможно использовать выведенные для других процессов обкатывания зависимости между силой обкатывания, глубиной пластических деформаций и свойствами обрабатываемого материала;

- сила АВ покрытий должна быть установлена исходя из условия сглаживания вершин неровностей обрабатываемой поверхности, а не получения пластических деформаций под подложкой, особенно в зоне соединения покрытия с подложкой;

- существует теоретически обоснованная оптимальная величина подачи, которая зависит от радиуса закругления инструмента и свойств обкатываемого металла;

- существует также теоретически обоснованная оптимальная величина вжатия инструмента, которая зависит от высоты неровностей поверхности перед обкатыванием. Для этого сила обкатывания, от которой непосредственно зависит величина вжатия, должна быть определена не только в зависимости от геометрии стыка и свойств обрабатываемого материала, но также и с учетом шероховатости обрабатываемой поверхности;

- на величину силы обкатывания оказывают влияние также другие параметры стереометрии поверхности (шаг микронеровностей, углы при вершине), что должно быть учтено при таком выборе;

- довольно сложная зависимость между силой обкатывания, величиной вжатия инструмента, геометрическими факторами области стыка, стереометрией обрабатываемой поверхности и механическими свойствами материала, может быть упрощена до линейной зависимости между силой обкатывания и величиной

неровности поверхности при остальных факторах, принятых как постоянные.

С целью показания корректности приведенных выводов, а также обнаружения совпадения или расхождения сил обкатывания, определенных по литературным источникам или полученных в работе зависимостях, проведена оптимизация параметров процесса АВ хромовых покрытий деталей машин.

Оптимизационные исследования были проведены на образцах типа валиков диаметром 36 мм и длиной 50 мм, изготовленных из стали 40Х с твердостью 230 НВ, с гальваническим хромовым покрытием толщиной 50 мкм, нанесенным непосредственно на стальную подложку. Параметры шероховатости хромового покрытия составляли: $R_a = 0,5 \div 0,63$ мкм, $R_z = 1,4 \div 1,9$ мкм, а твердость 400 НК.

Алмазное выглаживание выполнялось с помощью инструмента с наконечниками из алмазного композита "Карбонадо" на токарно - винторезном станке. На базе полученного ранее опыта в качестве переменных факторов решено принять: силу обкатывания $P = 60 \div 160$ Н; подачу инструмента $s = 0,03 \div 0,136$ мм/об; радиус закругления наконечника инструмента $R = 2 \div 4$ мм; окружную скорость обкатывания $v = 0,4 \div 1,4$ м/с.

В качестве критерия оптимизации принято минимальную шероховатость поверхности. Принятая в исследованиях целевая функция имеет вид

$$f = R_a = C + b_1 P + b_2 s + b_3 R + b_4 v + b_{11} P^2 + b_{22} s^2 + b_{33} R^2 + b_{44} v^2 + b_{12} P s + b_{13} P R + b_{14} P v + b_{23} s R + b_{24} s v + b_{34} R v \quad (25)$$

Таб. 1. Окончательные результаты поиска наименьшей шероховатости поверхности R_a

Сила Н	Подача мм/об	Радиус мм	R_a мкм
80	0,07	2,4	0,043
80	0,08	2,4	0,043
90	0,07	2,4	0,040
90	0,08	2,4	0,040
100	0,07	2,4	0,038
100	0,07	2,5	0,038
100	0,08	2,4	0,038
110	0,07	2,5	0,038
110	0,07	2,6	0,038
110	0,08	2,4	0,037
110	0,08	2,5	0,037

Для определения коэффициентов в уравнении (25) проведен эксперимент по программе Хартлея для четырех исходных факторов. После расшифровки и упорядочения полученных результатов измерений и расчетов, определены зависимости в виде как в уравнении (25). Это дало возможность выполнить оптимизацию методом "мин - макс", заключающимся в компьютерном поиске адекватной области исследований в пространстве

факторов, ограниченном входными и выходными значениями исходных факторов (P, s, v, R). Величины отдельных переменных факторов, шаги поисков и полученные значения результирующей функции помещены в табл. 1. На их основании можно утверждать, что для принятых условий существуют оптимальные величины: силы обкатывания $P = 110 \div 130 \text{ N}$; подачи инструмента $s = 0,076 \div 0,08 \text{ мм/об}$ и радиуса закругления инструмента $R = 2,5 \text{ мм}$.

Определенная в результате описанной процедуры минимальная шероховатость поверхности $R_a = 0,037 \text{ мкм}$. Поскольку полученный в исследованиях действительный наилучший результат составляет $R_a = 0,055 \text{ мкм}$ (при $P = 110 \text{ N}$, $s = 0,083 \text{ мм/об}$ $R = 3 \text{ мм}$, $v = 2,2 \text{ м/с}$), то можно утверждать об очень хорошей адекватности модели (25) реальным условиям, а использованную процедуру оптимизации считать достаточно быстрой, удобной и точной.

Дополнительные исследования, которые из-за технических причин выполнены в условиях только приближенных к оптимальным, подтвердили существование оптимальных интервалов силы и подачи обкатывания, а также радиуса закругления наконечника инструмента.

Следует также заметить, что при АВ хромовых покрытий оптимальная величина подачи подобная, как и при выглаживании мягкой стали, несмотря на то, что твердость хромовых покрытий значительно большая. В то же время оптимальная величина радиуса закругления наконечника инструмента подобна, как при обработке стали средней твердости. Следовательно, подбор параметров АВ хромовых покрытий не должен выполняться в соответствии с правилами, применяемыми при обработке стали, когда ее параметры исключительно зависят от твердости обрабатываемого материала.

Сила обкатывания хромовых покрытий является самым важным параметром АВ. При обкатывании деталей с покрытиями можно выделить следующие случаи:

1. Материалы покрытия и подложки вместе с зоной соединения имеют подобные упруго-пластические свойства. Тогда возникающие во время обкатывания деформации (вместе с этим перемещения элементов кристаллической решетки обоих металлов в пограничной области) как упругие, так и пластические имеют подобные значения, а обкатывание проходило бы аналогично как и обкатывание монометаллических элементов. При установлении силы и других параметров обкатывания не возникают дополнительные ограничения из-за наличия покрытия.

2. Материал покрытия имеет меньшую твердость (меньший предел пластичности), чем материал подложки. Тогда сила обкатывания подбирается так, как для обкатывания более слабого материала (покрытия) и так же как и в предыдущем случае ограничения, связанные с покрытием, не возникают при выборе параметров обкатывания.

3. Твердость покрытия является большей, чем подложки (именно это имеет место в случае хромовых покрытий). Чтобы не наступило отслоение покрытия от подложки во время обкатывания, должно быть исполнено следующее условие: *напряжения на глубине равной толщине покрытия, т.е. приведенные напряжения в зоне соединения покрытия с подложкой не должны превышать предел пластичности материала подложки (более слабого материала)*. В противном случае может случиться, что под действием силы обкатывания материал покрытия деформируется только упруго, а материал подложки - пластически, либо также пластические деформации обоих материалов будут значительно отличаться по величине, что в итоге приведет к разрыву адгезионных связей между подложкой и покрытием с последующим расслоением.

Итак, при подборе параметров, а собственно силы выглаживания деталей с хромовыми покрытиями, имеются существенные ограничения, вызванные тем, что такие покрытия имеют большую твердость (по отношению к твердости подложки) и одновременно очень малую толщину (кроме восстановительного хромирования). Если параметры обкатывания деталей с хромовыми покрытиями были бы подобраны на основе имеющихся в технической литературе рекомендаций (полученных для элементов монометаллических), то так установленные силы обкатывания должны были бы быть очень большими, а процессу АВ сопутствовало бы растрескивание, шелушение и другие повреждения покрытий.

Близким результатом к опытному является значение силы, рассчитанное по формуле (24), полученной в результате теоретических исследований. Принимая во внимание некоторую неточность взятых для расчетов табличных данных для электролитического хрома и практическую невозможность их опытной проверки, а также факт, что данная формула не учитывает влияния упрочнения материала в процессе обкатывания и изменения формы микронеровностей поверхности, полученную разницу между теоретической и экспериментальной силой обкатывания следует оценить как небольшую, а точность выведенных зависимостей как удовлетворительную подтверждая этим корректность выведенных формул.

Третий раздел работы содержит методику проведенных исследований, а именно: данные по материалам, образцам, методам и параметрам их обработки, методах исследований и экспериментальных установках, а также методики применяемых расчетов. Описаны также результаты исследований поверхностного слоя и выбранных эксплуатационных свойств деталей с хромовыми покрытиями.

Материалы, образцы и их обработка. Анализ деталей с хромовыми покрытиями производимых заводами юго-восточной Польши

показал, что чаще всего изготавливаются они со стали 40ХМ, 40Х, 45 и подобных, подвергаемых термическому улучшению. По выше указанной причине большинство исследований проведено на сталях 40Х и 40ХМ.

Необходимые образцы изготавливались из проката диаметром 36 мм, обработкой резанием (точение, фрезерование, шлифование) с применением типового инструмента и параметров обработки. Образцы для исследования качества покрытий и износостойкости имели цилиндрическую форму; микротвердость и металлографические исследования проводились на косых и прямоугольных шлифах, а остальные испытания проводились на специальных образцах показанных на рис. 4.

Результаты АВ хромовых покрытий преимущественно сравнивались с результатами полученными после полирования, так как этот метод отделочной обработки чаще всего принимается для хромированных деталей. Окончательная полировка проводилась на ленточном станке с помощью ленты с зернистостью Р 380. Выглаживание выполнялось на токарном станке с помощью специального приспособления, в котором устанавливался выглаживатель с шаровидным наконечником изготовленным из синтетического композитного материала "карбонадо". Параметры выглаживания изменялись в отдельных экспериментах.

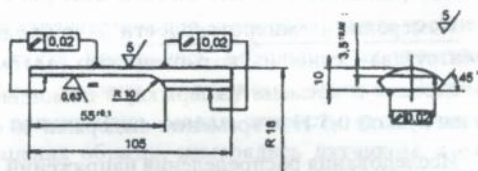


Рис. 4. Форма и размеры образцов

Хромирование образцов проводилось в промышленных условиях в ванне содержащей электролит о составе 99% CrO_3 + 1% H_2SO_4 , при температуре $50 \div 55^\circ\text{C}$, плотности тока $40 \div 45$ А/дм². Толщина наносимых хромовых покрытий составляла: 50 мкм на образцах из стали 40Х твердостью 230 НВ и 10 мкм на образцах из стали 40ХМ твердостью 32 HRC.

Адгезионные свойства покрытий оценивались методом быстрых изменений температуры и методом прогибов: если не появлялись отслоения покрытия, образцы считались правильными.

Герметичность покрытий оценивалась методом погружения образцов на 10 мин в раствор: 10 г NaCl + 1 г $\text{K}_3\text{Fe}(\text{CN})_6$ + 1000 г H_2O . Об качестве покрытия свидетельствовало количество точек диаметром менее 1 мм на поверхности одного квадратного дюйма.

Исследования стереометрии поверхности. В этих исследованиях измерялась шероховатость поверхности (R_a , опорная длина профиля и др.) и вычерчивался профиль поверхности. Исследования проводились с помощью профилометра

ME10 модифицированного таким образом, что измерительный сигнал после обработки, направлялся в компьютер IBM, в котором проводился его полный анализ с помощью специально разработанной программы. Измерения выполнялись при базовой длине равной 0,8 мм на длине оценки $8 \div 16$ мм в разных местах образца и в конце рассчитывался средний результат. Профили вычерчивались при одинаковом увеличении. Примеры фотографий поверхности и результаты исследований приведены в работе.

Металлографические исследования проводились на электронном микроскопе и микроскопе Неофот. Исследования структур выполнялись на срезах перпендикулярных поверхности полированной абразивной бумагой с уменьшающейся зернистостью (от P 120 до P 1000) и в конце войлочным кругом, смачиваемым водой с добавкой Al_2O_3 грануляции 1000. Травление поверхностей образцов проводилось в растворе: 3% весовых частей HNO_3 + 97% весовых частей C_2H_5OH .

Измерения микротвердости проводились на установке фирмы Матсузава-Сейко (с возможностью автоматической регулировки скорости внедрения и времени выдержки) с помощью индентора Кноопа либо Викерса с нагрузкой 0,5 Н и временем выдержки 10 с.

Исследования распределения напряжений в поверхностном слое выполнялись методом электротравления слоев в ванне, содержащей: 60% H_3PO_4 + 20% H_2SO_4 + 20% H_2O на специально подготовленном стенде с компьютерным расчетом напряжений. Величины напряжений рассчитывались по формуле Давиденкова-Биргера. Результаты распределения напряжений печатались в табличной и графической форме.

Исследования усталостной прочности проводились ускоренным методом при двухстороннем изгибе образцов на специальном стенде. Вырезанны из втулки образец, показанный на рис. 4, закреплялся утолщенной частью в гидравлическом зажиме на столе электродинамического вибратора, вводился в резонансные колебания а величина прогиба его свободного конца пропорциональна напряжениям в месте образования трещины, которая всегда образуется на цилиндрической, обработанной (полированной, выглаживанной или необработанной) поверхности в центре образца. Частота колебаний находилась в пределе 100-900 Гц. Появление усталостной трещины вызывало понижение частоты собственных колебаний. Испытание прекращалось, если образец прошел $2 \cdot 10^6$ циклов или если его частота собственных колебаний уменьшилась на 5%. Предел усталостной прочности определяли методом "лестницы" на основании $12 \div 20$ образцов.

Исследования износостойкости проводились по схеме трения двух валиков с перпендикулярными осями. Контртелом в исследованиях являлся валик диаметром 60 мм изготовленный из стали 55, закаленный до 58 HRC, цилиндрическая поверхность которого шлифована до шероховатости $R_a = 0,32$ мкм. Контробразец закреплялся в центрах токарного станка, а в резцедержателе устанавливалось приспособление с исследуемым образцом, который прижимался (упруго) силой 20 Н к контробразцу. Исследуемый образец был таким же, как и в усталостных испытаниях. Применяемая схема трения двух валиков с перпендикулярными осями применяется обычно для исследования тонких покрытий и сплавов. В принятой схеме удельное давление в месте контакта постепенно уменьшалось (по мере роста поверхностей контакта из-за износа). Износ образцов оценивался по перемещению индукционного датчика с точностью 0,1 мкм, которое пропорционально сближению трущихся элементов из-за их износа в месте контакта. Скорость износа, сначала большая, затем уменьшалась и стабилизировалась на характерном для данного варианта уровне. Во время испытания в место контакта подавалось небольшое количество машинного масла, обеспечивающего условия полусухого трения. Чтобы уменьшить нагрев зоны контакта принималась малая скорость скольжения составляющая ~ 57 м/мин. Перемещения образца измерялись датчиком, а их значения через измерительный интерфейс направлялись в компьютер, где обрабатывались по специальной программе; результаты печатались в табличной и графической форме.

Исследования контактной усталости проводились в специальном приборе установленном на электродинамической вибрационной установке. Испытуемый образец нагружался пульсирующим напряжением посредством твердого шарика диаметром 6 мм. Параметры исследований подобраны таким образом, чтобы номинальное напряжение не вызывало пластических деформаций в зоне контакта шарика с поверхностью исследуемого образца. Исследования проводились при частоте колебаний образцов 2300 Гц, амплитуде 15 мкм, и нагружающей массе 150 г.

Из-за циклического упругого деформирования поверхности хромового покрытия, параметры которого были постоянными, на исследуемой поверхности появлялись характерные, круговые следы контакта и типовые для такого способа нагружения и отмечался усталостный износ, характеризующийся фреттингом, выкрашиванием и трещинами, которые располагались концентрично круговому следу контакта. Усталостный износ исследуемых образцов оценивался визуально на стереоскопическом микроскопе, а также на основе фотографии следов износа полученных на металлографическом микроскопе.

Результаты исследований поверхностного слоя и эксплуатационных свойств деталей с хромовыми покрытиями. Эти исследования проведены на хромированных образцах с подложкой из стали малой и средней твердости. Принимая во внимание технические ограничения, параметры АВ покрытий в случае образцов с подложкой низкой твердости подобраны на основе результатов оптимизации, а в остальных случаях опытным путем, так чтобы получить шероховатость поверхности возможно подобной к получаемой после полирования (это не были оптимальные параметры, а только обеспечивающие требуемую шероховатость, в этом случае $R_a = 0,08 \div 0,16$ мкм). Чтобы выяснить влияние вида финишной обработки не только хромового покрытия, но и подложки, отдельные партии образцов были обработаны при изменении очередности последних операций технологического процесса, например полируя либо обкатывая подложку, либо (и) покрытие.

Из измерений и вычислений некоторых стандартных и нестандартных параметров шероховатости обработанных поверхностей, оказалось, что образцы, обработанные АВ не очень отличаются от обработанных полированием (см. также профилограммы поверхности на рис. 5). Можно утверждать, что после АВ радиусы закругления вершин и впадин неровности являются большими, чем после полирования либо только хромирования, что


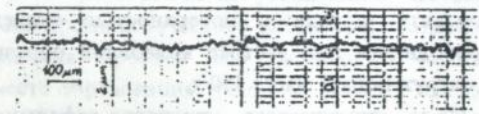

Очередность операций	R_a , мкм	R_z , мкм	Профилограммы
П+Х	0,20-0,42	0,32	
П+Х+П	0,08-0,20	0,14	
П+Х+АВ	0,04-0,16	0,09	

Рис. 5. Примерные профилограммы поверхности образцов обработанных разными способами отделочной обработки: П - полирование; Х - хромирование; АВ - алмазное выглаживание

может положительно влиять на усталостную прочность. Как видно из рис. 6 опорная кривая профиля имеет наиболее благоприятную форму в полированных образцах, самую плохую - в необработанных образцах и среднюю - после алмазного выглаживания покрытий. Такое же положение повторяется в обеих исследованных группах образцов.

Результаты исследований не показали существенной разницы сцепляемости (адгезии) покрытий, обработанных согласно отдельным вариантам - она была одинаково хорошая у всех исследованных покрытий.

Хотя в случае технического хромирования исследования его плотности не имеют большого значения (хромовое покрытие часто выполняется как пористое), то однако на основе выполненных исследований, можно констатировать отсутствие заметного влияния метода обработки покрытия на его плотность. Вообще можно отметить, что метод отделочной обработки (очередность операций) хромовых покрытий не оказывает большого влияния на их плотность и сцепляемость.

Металлографические исследования позволили визуально оценить качество и состояние поверхности и приповерхностного слоя образцов, а также контроль действительной толщины хромового покрытия и структуры стальной подложки. Микроскопические исследования и анализ полученных фотографий поверхностей и сечений образцов не выявили каких-либо отступлений в структуре подложки либо дефектов покрытий.

Результаты исследований микротвердости также не показали существенной разницы между образцами, обработанными по отдельным вариантам, что дает основание констатировать отсутствие влияния АВ на твердость хромовых покрытий.

От распределения напряжений в поверхностном слое в значительной степени зависит усталостная прочность исследуемых элементов. В соответствии с результатами проведенных исследований можно утверждать, что чем более

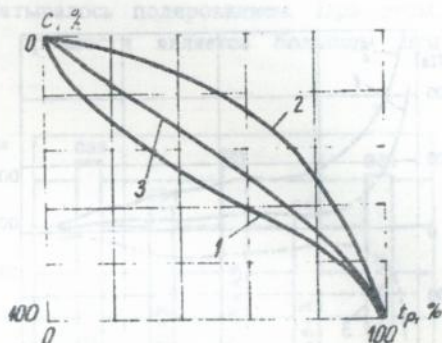


Рис. 6. Графики относительной опорной кривой профиля: 1 - хромовое покрытие без обработки; 2 - покрытие после полирования; 3 - покрытие после алмазного выглаживания

твердый исследуемый материал, тем больше влияние состояния напряжений в верхнем слое образца. Вообще признанным является факт, что растягивающие напряжения в верхнем слое являются вредными, а сжимающие - влияют положительно на ряд эксплуатационных свойств и прежде всего на усталостную прочность монометаллических элементов. Подобных зависимостей можно

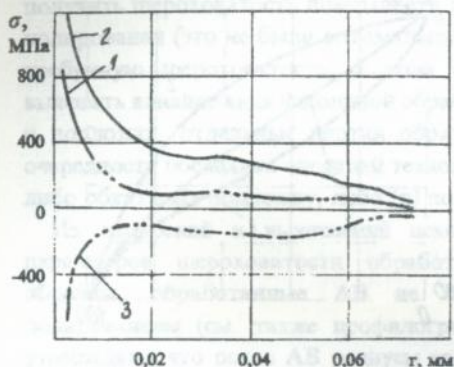


Рис. 7. Примерные графики распределения напряжений в поверхностном слое: 1 - покрытие без обработки; 2 - покрытие после полирования, 3 - покрытие после алмазного выглаживания

ожидать и для хромовых покрытий.

Примерные результаты исследований распределения напряжений приведены на рис. 7.

Характерным для всех исследованных образцов является то, что напряжения как в покрытии, так и в слое подложки непосредственно под покрытием в отдельных вариантах образцов отличаются как по знаку (виду напряжений), так и их значению. Можно также констатировать, что в случае стальной подложки со средней твердостью решающим фактором является способ обработки покрытий, а не подложки, а именно:

- когда покрытие было обработано АВ наблюдается появление сжимающих напряжений как в хромовом покрытии, так и в подложке;
- когда покрытие обработано полированием наблюдается наличие растягивающих напряжений и в покрытии и в подложке;
- в образцах, в которых покрытие не обрабатывалось, наблюдается появление растягивающих напряжений.

В образцах с малой толщиной покрытия обнаружено также влияние АВ на состояние напряжений в подложке - возникают в ней сжимающие напряжения. При большей толщине хромовых покрытий не наблюдается такого влияния.

Итак, на основании полученных результатов можно констатировать, что независимо от метода обработки подложки, хромирование вызывает появление растягивающих напряжений в верхнем слое элементов, а также что путем АВ покрытий можно изменить это состояние напряжений на сжимающие.

Принимая во внимание результаты исследований усталостной прочности, показаны на рис. 8, можно подтвердить факт значительного вредного влияния хромирования на усталостную прочность. После хромирования она может ухудшиться более чем на 30%.

Можно также утверждать, что те варианты образцов, в которых покрытие было обработано методом АВ, имеют заметно лучшую усталостную прочность, чем те, в которых покрытие обрабатывалось полированием. При этом, процентное повышение усталостной прочности является большим при обкатывании покрытий на подложке с меньшей твердостью.

Усталостную прочность деталей полностью определяют методы обработки хромовых покрытий. Незначительное влияние обработки подложки было получено только в случае низкой ее твердости. Здесь наилучшую усталостную прочность показали образцы, в которых обкатывано как подложку, так и покрытие. В то же время для стали с твердостью 32 HRC влияние обработки подложки оказалось незначительным: в двух наилучших вариантах (с покрытием обработанным АВ) разница усталостной прочности составляла менее 5% в пользу деталей с полированной подложкой.

Применение АВ хромовых покрытий позволяет в значительной степени уменьшить вредное влияние хромирования на усталостную прочность при симметричном изгибе. При этом возможно получить такую же усталостную прочность, как и при не хромированных элементах. Полирование на столько незначительно улучшает усталостную прочность, что не может рассматриваться как противоусталостная обработка хромовых покрытий.

Можно также констатировать, что улучшение усталостной прочности после АВ хромовых покрытий обеспечивается главным образом благодаря возникновению сжимающих напряжений в хромовом покрытии. Это подтверждается тем, что образцы полированные и обработанные АВ, показали существенную разницу только в плане напряжений, в то время как другие

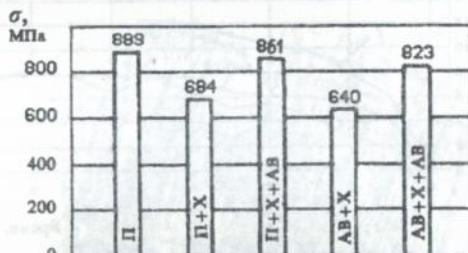


Рис. 8. Усталостная прочность образцов из стали 40ХМ с твердостью 32 HRC с хромовым покрытием толщиной 10 мкм после различных вариантов отделочной обработки: П - полирование, Х - хромирование, АВ - алмазное выглаживание

показатели состояния верхнего слоя были подобны полученным после указанных вариантов отделочной обработки.

Поскольку хром является металлом, хорошо работающим в условиях трения скольжения по стали, то трудно еще улучшить эти трибологические свойства технологическими методами. В практике такой необходимости нет, чаще всего наносится покрытие хрома такой толщины, которая является достаточной на

целый период эксплуатации изделия.

Износ, мкм

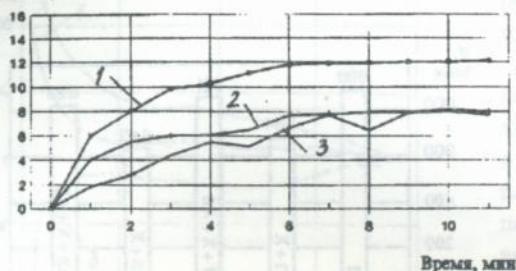


Рис. 9. Трибологический износ покрытий в зависимости от способа обработки: 1 - покрытие без обработки; 2 - покрытие после полирования, 3 - покрытие после алмазного выглаживания

Исследованные детали с необработанным покрытием показали значительно больший износ, чем с обработанным (см. рис. 9). Износ деталей, обработанных АВ, был меньший, чем у полированных образцов. Эту разницу следует однако считать ничтожной, т.к. она соизмерима с разбросом результатов измерений, составляющим в среднем ± 1 мкм.

Итак, можно утверждать, что АВ хромовых покрытий не улучшает трибологической износостойкости на столько, чтобы можно было его считать противозносной обработкой.

На рис. 10 показаны примерные фотографии отпечатков - следов износа, возникающего при исследованиях контактной усталости деталей с хромовыми покрытиями. Характерные признаки фреттинг - износа в виде кольца темного порошка можно наблюдать на покрытиях обработанных АВ, в меньшем количестве на полированных покрытиях. Наиболее износостойкие оказались не обработанные хромовые покрытия, в которых наблюдались растягивающие напряжения большой величины. Как отмечено в технической литературе работа элементов в условиях контактной усталости ведет между прочим к появлению в верхнем слое сжимающих напряжений. Если в поверхностном слое существуют технологические сжимающие напряжения, получаемые во время обработки, то они могут суммироваться и таким образом повысить результирующие напряжения, что приведет к более быстрому износу покрытий. Этот механизм является характерным для обкатываемых покрытий, где дополнительно наклеп



П+Х

$6,0 \cdot 10^6$ циклов



П+Х+АВ

$8,5 \cdot 10^6$ циклов



П+Х+П

$6,8 \cdot 10^6$ циклов

Рис. 10. Примерные фотографии поверхности хромовых покрытий после исследований контактной усталости. Обозначения операций отделочной обработки: Р - полирование, Х - хромирование, АВ - алмазное выравнивание; увеличение 150х

верхнего слоя способствует окислению и более быстрому фреттингу. В то же время в полированных и не обработанных покрытиях технологические напряжения являются растягивающими, противоположного знака, чем возникающие во время работы в условиях контактной усталости и поэтому суммарные напряжения в таких покрытиях меньше, а их контактная прочность выше, чем в случае обкатанных покрытий. Поэтому АВ не может быть рекомендовано для обработки покрытий, работающих в условиях контактной усталости.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

На основе выполненных теоретических и экспериментальных исследований можно сделать следующие выводы, которые сгруппированы по наиболее важным проблемам.

1. Обкатывание хромовых покрытий

1.1. Методом АВ можно эффективно обрабатывать хромовые покрытия без появления трещин, шелушений, расслоений либо других повреждений, естественно при условии правильного подбора режимов обработки. Из-за

значительных разниц механических свойств хромовых покрытий, очень сложно сформулировать точные рекомендации относительно общего выбора режимов АВ покрытий. Эти режимы следует устанавливать так, чтобы получить возможно меньшую шероховатость поверхности хромового покрытия, т.к. оно должно быть чистовым. При АВ покрытий, режимы процесса должны быть подобраны в зависимости от высоты микронеровностей поверхности, механических свойств покрытия, толщины покрытия и механических свойств подложки.

Аналитический выбор режимов чистового АВ хромовых покрытий является возможным на основе выведенных формул, в которых отражены взаимные зависимости между свойствами обрабатываемой детали и режимами выглаживания - силой обкатывания, радиусом закругления наконечника инструмента и глубиной его вжатия.

1.2. При выборе режимов АВ покрытий нельзя использовать рекомендаций, данных для сталей. Ни одной из встречаемых в литературе формул для подбора режимов обкатывания нельзя здесь воспользоваться, так как касаются они либо упрочняющего обкатывания, либо содержат опытные коэффициенты исключающие использование этих формул в других условиях. В общем можно сказать, что хромовые покрытия следует обкатывать инструментами с большим радиусом закругления наконечника и меньшей силой, чем бы это требовалось из-за большой твердости покрытий.

1.3. При АВ хромовых покрытий с шероховатостью $R_a = 0,32 \div 0,63$ мкм и толщине более 10 мкм, нанесенных непосредственно на стальную подложку низкой или средней твердости, рекомендуются: алмазный инструмент с радиусом закругления 3-4 мм, силу дожатия инструмента $90 \div 130$ Н, подачу инструмента $0,07 \div 0,09$ мм/об, окружную скорость обкатывания $0,5 \div 1,5$ м/с обработку без смазывающе-охлаждающей жидкости.

2. Состояние верхнего слоя покрытия.

2.1. Напряжения в верхнем слое хромированных элементов. В слое нанесенного гальваническим путем хрома, а также в стальной подложке возникают растягивающие напряжения. Это главная причина значительного ухудшения усталостных свойств. Полирование практически не изменяет этого положения, т.к. после полирования также выявляются растягивающие напряжения. В то же время, после АВ деталей с хромовыми покрытиями наблюдается существенное изменение состояния напряжений - в верхнем слое, возникают сжимающие напряжения, что считается полезным с точки зрения усталостных свойств, особенно для материалов высокой твердости, в которых состояние напряжений существенно влияет на усталостную прочность. Итак, можно констатировать, что способ отделочной обработки покрытий определяет состояние напряжений в верхнем слое хромированных элементов.

2.2. Состояние поверхности хромовых покрытий. Важным эффектом АВ является уменьшение шероховатости обрабатываемых поверхностей. Без специальных усилий возможно уменьшение значения параметра R_a хромовых покрытий в 2÷3 раза при одном проходе инструмента и получение такой шероховатости как после технического полирования. При оптимизации режимов обработки возможно обеспечить шероховатость поверхности $R_a < 0,08$ мкм. Поверхности хромовых покрытий после АВ характеризуются зеркальным блеском, на них отсутствуют единичные разнонаправленные риски различной глубины и длины так характерны для технического полирования. В то время другие параметры стереометрии поверхности после АВ близки полученным после полирования.

2.3. Микротвердость. После АВ хромовых покрытий не зафиксировано существенных изменений микротвердости на различных глубинах сечения образцов. Хромовые покрытия являются очень твердыми по своей природе и дальнейшее повышение их твердости особенно в процессе обкатывания, осуществляемого с малыми силами, является ничтожным и находится в пределах ошибки метода измерения. С этого следует, что АВ не может быть использовано как упрочняющая обработка.

3. Эксплуатационные свойства и возможность применения АВ хромовых покрытий

3.1. В результате выполненных исследований установлено, что усталостную прочность при симметричном изгибе хромированных элементов, работающих в области упругих деформаций полностью определяет способ обработки покрытия. АВ покрытий может улучшить усталостную прочность даже более чем на 30%. Тем самым хромированные элементы получают такую усталостную прочность, которую имели перед нанесением покрытия, что означает полную нейтрализацию вредного воздействия хромирования. Благодаря этому можно расширить область применения хромированных элементов, например, реализовать регенерацию (путем хромирования) элементов, работающих в усталостных условиях.

Полирование покрытий в лучшем случае может улучшить усталостную прочность на несколько процентов.

Элементы полученные АВ показывают существенно другое (от полированных) состояние напряжений, а при этом небольшую разницу остальных параметров верхнего слоя. Затем можно констатировать, что улучшение усталостной прочности получено благодаря возникновению (с помощью АВ) сжимающих напряжений в верхнем слое.

3.2. АВ не приводит к существенным изменениям других эксплуатационных свойств деталей таких как: износостойкость, плотность или сцепляемость хромовых покрытий, поэтому может применяться в качестве отделочной обработки элементов, работающих, например, в условиях трения, особенно там, где окажется это экономически обоснованным.

3.3. Не должно применяться АВ хромовых покрытий элементов, работающих при постоянном контакте в условиях колебаний или переменных нагрузок, когда предрасположенность к фреттинговому износу обкатанных покрытий является большей, чем полированных или вообще не обработанных покрытий.

4. Недостатки и ограничения к применению АВ покрытий.

4.1. Основной недостаток АВ это низкая производительность процесса. Вытекает это с необходимости использования малых подач при обработке. Теоретически эти недостатки можно компенсировать применением больших скоростей обработки (более 2 м/с), однако на металлорежущих станках, на которых обычно выполняется АВ, невозможно их обеспечить.

Увеличение производительности можно обеспечить многоинструментальной обработкой, однако это потребует изготовления захватов инструментов с большой точностью. К тому же, их применение в каждом случае не возможно, например из-за конструкции обрабатываемой детали.

4.2. АВ не должно применяться как упрочняющая обработка хромовых покрытий. Эффект, обычно оцениваемый, как приращение микротвердости, будет ничтожным.

4.3. АВ в характере размерной обработки может быть выполнено только на станках большой жесткости, при жестком дожиме инструмента, а такая система весьма предрасположена к колебаниям. При жестком дожатии инструмента колебания припуска могут дестабилизировать протекание процесса.

4.4. Остальные ограничения в отношении АВ подобны как и для других методов статического обкатывания; затруднена обработка малых отверстий, криволинейных поверхностей, каналов, прерывистых поверхностей с малыми радиусами и т.д.

Основные результаты диссертации опубликованы в следующих работах:

1. Korzyński M.: Nagniatanie powłok chromowych. Mat. III KNT "Wytwarzanie elementów maszyn z materiałów o specjalnych właściwościach", Rzeszów, 1985, с. 228-232.

2. Korzyński M., Lunariski J.: Automatisierung der Messung und Berechnung von Eigenspannungen in der oberen Schicht. Int. Konf. Rationalisierung im Maschinenbau, Zwickau, 1985, (4), c. 56-62.
3. Korzyński M., Lunariski J., Dul-Korzyńska B.: Opracowanie i wdrożenie technologii nagniatania ślizgowego tłoczek. Sprawozdanie z pracy U-1101 dla Huty Stalowa Wola, Rzeszów, 1985. Страниц 85, таблиц 10, рисунков 64.
4. Korzyński M.: Obrabiarka do nagniatania ślizgowego powierzchniowo utwardzanych czół tulei grubościennych. Dokumentacja konstrukcyjna i sprawozdanie z umowy U - 1643 dla Huty Stalowa Wola, Rzeszów, 1987. Страниц 20, рисунков 111.
5. Korzyński M., Zielecki W., Gruszkowski Cz.: Opracowanie i wdrożenie technologii nagniatania ślizgowego rdzenników i tłoczek. Sprawozdanie z pracy U - 1753 dla Fabryki Maszyn Wiertniczych i Górniczych "Glinik" w Gorlicach, Rzeszów, 1987. Страниц 40, таблиц 5, рисунков 26.
6. Korzyński M.: Właściwości powłok chromowych po nagniataniu ślizgowym. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej nr 35, Rzeszów, 1987, c. 55-62.
7. Korzyński M.: Wpływ nagniatania ślizgowego na wybrane właściwości stali. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej nr 35, Rzeszów, 1987, c. 11-18.
8. Korzyński M.: Nagniatanie ślizgowe narzędziami diamentowymi. W książce: Nowe technologie nagniatania i ich zastosowanie w przemyśle elektromaszynowym. Wyd. ODK SIMP Rzeszów, 1987, c. 37-52.
9. Korzyński M.: Zastosowanie nagniatania dla poprawy właściwości tribologicznych elementów maszyn. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej nr 36, Rzeszów, 1987, c. 131-135.
10. Korzyński M.: Wpływ nagniatania ślizgowego na właściwości zmęczeniowe elementów z powłokami chromowymi. Mat. XII Seminarium "Wytrzymałość i mechanika zmęczenia materiałów i konstrukcji". Bystre, 1988, c. 51-52.
11. Korzyński M.: Wpływ nagniatania ślizgowego na stan warstwy wierzchniej i wytrzymałość zmęczeniową chromowanych części maszyn. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej nr 46, Rzeszów, 1988, c. 45-55.
12. Korzyński M., Zielecki W.: Nagniatanie ślizgowe powłok kadmowych. Mat. IV KNT. "Technologia obróbki nagniataniem". Bydgoszcz, 1988, c. 30-37.
13. Korzyński M.: Ocena możliwości i efektywności nagniatania elementów z pokryciami kadmowymi. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej nr 46, Rzeszów, 1988, c. 57-66.
14. Korzyński M., Dul-Korzyńska B.: Urządzenie do dwustronnej obróbki powierzchniowo utwardzanych czół tulei grubościennych. Mat. II KNT "Technologia produkcji masowej". Rzeszów, 1988, c. 169-172.

15. Korzyński M., Łunarski J., Nyklewicz J.: O możliwości wymiarowej regeneracji części maszyn pracujących w warunkach obciążeń zmiennych. III KNT Eksploatacją środków trwałych. Rydzyna, 1989, c. 66-73.
16. Korzyński M.: Analiza przyczyn powstawania nierówności powierzchni przy nagniataniu ślizgowym. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej nr 69, Rzeszów, 1990, c. 27÷38.
17. Korzyński M. и др.: Nagniatanie ślizgowe powłok chromowych. Sprawozdanie z pracy dla Instytutu Podstawowych Problemów Techniki Polskiej Akademii Nauk w Warszawie, Rzeszów, 1990. Страниц 429, таблиц 182, рисунков 150.
18. Korzyński M.: Dobór wartości wcisku narzędzia przy nagniataniu ślizgowym. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej nr 69, Rzeszów, 1990, c. 9-25.
19. Korzyński M.: Stan warstwy wierzchniej i wybrane właściwości elementów ze stali 40HM z powłoką ONSC. Mat. KNT Celostatne dni tepelneho spracovania. Bratislava, 1990, c. 45-47.
20. Korzyński M.: Optymalizacja parametrów nagniatania ślizgowego powłok chromowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej nr 83, Rzeszów, 1991, c. 11-22.
21. Кожыньски М.: Оптимальное значение натягу при алмазному выглаживаниі сферичными наконечником. Вісник ЛПИ, Н 225, 1991, c. 22÷25.
22. Korzyński M.: Analiza odkształceń nierówności powierzchni przy nagniataniu ślizgowym. Postępy technologii maszyn, nr 2, 1991, c. 33÷46
23. Korzyński M.: Uchwyt mimosrodowy do nagniatania ślizgowego tulei. Patent PRL nr 150982, 1991.
24. Korzyński M.: Sposob nagniatania powierzchni zwłaszcza płaskich pierścieniowych, a także urządzenie do nagniatania powierzchni zwłaszcza płaskich pierścieniowych. Patent PRL nr 150914, 1991.
25. Working properties of alloys after slide burnishing. IV Int. Conf. on Shot Peening, Cincinatti 1992, c. 46-52.
26. Korzyński M.: The diamond burnishing of chromium plated steel. XIV KNT "National Days on Heat Treatment", Strbske Pleso - Bratislava, 1992, c. 119÷120.
27. Korzyński M., Cisek Z.: Some properties of oxide-nitride-sulfurized parts after slide burnishing. XIV KNT "National Days on Heat Treatment", Strbske Pleso - Bratislava, 1992, c. 109÷110.
28. Korzyński M.: Nagniatanie powłok chromowych. Zeszyty Naukowe Politechniki Rzeszowskiej nr 124, Rzeszów, 1994, c. 1-129.

W. Korzyński

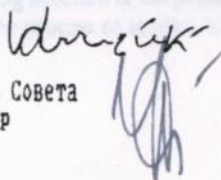
Справка

о личном участии соискателя М. Кожиньского в совместных публикациях, отражающих основное содержание, положения и выводы диссертации "Технология алмазного выглаживания деталей с хромовыми покрытиями"

1. Кожиньски М., Лунарский Я. Автоматизация измерений остаточных напряжений в поверхностных слоях деталей. Материалы нежидкостной конференции "Прогресс в машиностроении", т. 4, Цвикау, 1985, с. 56-62 - соискателем выполнено теоретическое обоснование экспериментов и расчеты - 60% содержания публикации
2. Кожиньски М., Лунарский Я., Дуль-Кожиньска Б. Разработка и внедрение технологии выглаживания лопатки И101, Хута Сталева Воля, Жешув, 1985, с. 85 - соискателем выполнены технологические расчеты и разработаны принципы конструкции станка - 40% содержания публикации
3. Кожиньски М., Зеленки В. Выглаживание калиевых покрытий. Мат. IV конференции "Технология поверхностной пластической обработки", Быдгощ, 1986, с. 30-37 - соискателем выполнена теоретическая часть работы - 50% содержания публикации
4. Кожиньски М., Дуль-Кожиньска Б. Приспособление для двустороннего выглаживания торцов толстостенных труб. Мат. II конференции "Технология массового производства", Жешув, 1988, с. 169-172 - соискателем принадлежит разработка конструкции приспособления - 70% содержания публикации
5. Кожиньски М., Лунарский Я., Никлевич Я. О возможности размерного восстановления деталей, работающих в условиях переменных нагрузок. Мат. III конференции "Эксплуатация машин", Ридзина, 1989, с. 56-73 - соискателем выполнены расчеты параметров процесса - 70% содержания публикации
6. Кожиньски М. и др. Выглаживание хромовых покрытий. Институт проблем техники Польской академии наук, Варшава-Жешув, 1990, 429с. - соискателем выполнены теоретическая часть работы и руководство авторским коллективом - 50% содержания публикации
7. Кожиньски М., Тисек Э. Некоторые свойства деталей с оксидно-сульфидными покрытиями после выглаживания. Мат. XIV международной конференции "Национальные дни термической обработки", Братислава, 1992, с. 109-110 - соискателем выполнены экспериментальные исследования - 40% содержания публикации.


Собственных работ у соискателя по теме диссертации - 21.

Соискатель



Кожиньски М.

Ученый секретарь Совета
д. т. н., профессор



Равська Н.С.

ТЕХНОЛОГІЯ АЛМАЗНОГО ВИГЛАДЖУВАННЯ ДЕТАЛЕЙ З ХРОМОВИМИ ПОКРИТТЯМИ

Проаналізований стан теорії та практики технології алмазного вигладжування деталей з хромовими покриттями. Відсутня комплексно-експериментальна розробка цієї проблеми, хоча обробка покриття через зміни стану поверхневого шару викликає суттєве покращення експлуатаційних властивостей, а особливо втомлювальної міцності.

Розроблена та досліджена модель алмазного вигладжування як процесу деформування клинів мікронерівностей оброблюваних поверхонь нормальним зусиллям. На підставі аналізу зони контакту інструменту з деталлю визначені оптимальні значення притиску інструменту в залежності від потрібної шорсткості поверхні деталі, величини подачі та сили вигладжування, сили і кінематичних параметрів вигладжування та стереометрії оброблюваної поверхні. Отримані теоретичні залежності детально перевірені експериментально, стверджена досить висока схожимість результатів, виявлено, що вигладжування суттєво впливає на стан залишкових напружень. Подані також результати досліджень втомлювальної міцності, стійкості трибологічного зношування та контактної втомлювальної міцності.

Сформульовані висновки що до фізико-механічних явищ при алмазному вигладжуванні хромових покриттів, вибору параметрів вигладжування, їх обмежень, оптимізації та доцільного застосування процесу в промисловості.

BURNISHING OF THE CHROMIUM ELECTROPLATED COATINGS

In this work, upon theoretical analysis, optimum amount of the interference between tool and workpiece depending on surface roughness is defined. Models of the burnishing process, that can be found in literature, have been critically analysed, and their very limited usefulness or defining interrelations between slide burnishing process variables is shown. Accepting model of the burnishing process as a process of surface roughness wedges deformation, and applying accordingly well known solution for the wedge compressed with normal force, the formula has been obtained which describes interrelation between tool interference, tool pressure and another parameters of the process. This equation, that enables to select optimum burnishing force, was simplified for the case of selected chromium coatings electroplated on the substrate that had been tape polished, and was tested by experimental optimization. It has been demonstrated that suggested equation shows better conformity with experimental results than any other formula that had been published in the relevant literature.

In this work comparative examinations of the surface layer condition are carried out. Significant effect of the slide burnishing process, especially on residual stresses in chromium plated components, is indicated. Among the others, such properties were tested as: fatigue strength at oscillatory bending, tribological wear resistance, and contact fatigue strength.

Basing on the work results, conclusions have been derived in respects to physical and mechanical phenomena related to slide burnishing process. The potentially that slide burnishing process has for both substrate and chromium coating improvement is discussed, and suggestions are made concerning selection of the process variables, as well as some notes on usefulness and limitations of the process as applied to the chromium coatings.

