

На правах рукописи

Горбунов Андрей Владимирович

**ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА УПРОЧНЕНИЯ МАЛОЖЕСТКИХ
ВАЛОВ ЦЕНТРОБЕЖНЫМ ОБКАТЫВАНИЕМ**

Специальность 05.02.08 – Технология машиностроения

АВТОРЕФЕРАТ

диссертации на соискание учёной степени
кандидата технических наук

Иркутск 2013

Работа выполнена в ФГБОУ ВПО «Иркутский государственный технический университет»
на кафедре Машиностроительных технологий и материалов

Научный руководитель:

Зайдес Семен Азикович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой Машиностроительных технологий и материалов ФГБОУ ВПО «Иркутский государственный технический университет»

Официальные оппоненты:

Димов Юрий Владимирович

доктор технических наук, профессор кафедры Конструирования и стандартизации в машиностроении ФГБОУ ВПО «Иркутский государственный технический университет»

Тютрин Николай Орестович

кандидат технических наук, генеральный директор ЗАО НПЦ «СибирьТрансИнжиниринг», г. Иркутск

Ведущая организация:

ФГБОУ ВПО "Иркутский государственный университет путей сообщения", г. Иркутск.

Защита состоится 18 декабря 2013г в 12-00 ч на заседании диссертационного совета Д212.073.02 Иркутского государственного технического университета по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, конференц-зал.

С диссертацией можно ознакомиться в библиотеке Иркутского государственного технического университета.

Автореферат разослан 18 ноября 2013г.

Отзывы на автореферат (в двух экземплярах, заверенных печатью организации) просьба высылать по адресу: 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83, ИрГТУ; ученому секретарю диссертационного совета Д 212.073.02 Салову В.М.

e-mail: salov@istu.edu,

тел./факс: (3952) 40-51-17

Ученый секретарь диссертационного совета,
профессор

В.М. Салов

ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ДИССЕРТАЦИОННОЙ РАБОТЫ

Актуальность работы. Маложесткие детали типа валов, осей штанг широко применяют в транспортной и сельскохозяйственной технике, в водных судах и металлорежущих станках, в разнообразных механизмах горнорудной и текстильной техники.

Создание новых конструкционных материалов с повышенной прочностью и стремление к экономии металлов все больше приводит к увеличению номенклатуры класса маложестких изделий.

Малая изгибная жесткость стержневых деталей вызывает существенные проблемы при их обработке и сборке, поэтому такие детали обычно являются нетехнологичными. Для уменьшения прогибов при механической обработке приходится уменьшать частоту вращения заготовки, подачу и глубину резания, что автоматически приводит к снижению производительности труда и повышению длительности технологического процесса обработки.

Изгибную жесткость изделий при механической обработке можно повысить за счет использования технологических опор в виде люнетов или за счет использования деформирующего инструмента замкнутого типа. К сожалению, эффективных результатов, в этом направлении пока не получено, так как не устранена основная причина вызывающая искривление валов – вращения длинномерной заготовки, и как следствие, появление центростремительных сил, искажающих форму изделия.

Другим важным моментом при обработке маложестких деталей является состояние поверхностного слоя. С одной стороны, он должен обеспечивать геометрическую стабильность при внешнем воздействии рабочего инструмента, а с другой стороны, поверхностный слой должен принимать упругопластическое воздействие для формирования необходимых требований к качеству изделия: глубина упрочнения, степень наклепа, шероховатость и остаточные напряжения.

Если для жестких деталей такие разноплановые задачи не вызывают проблем, то для маложестких они являются взаимоисключающими. Поэтому в данной работе была поставлена задача по обеспечению геометрической стабильности стержневых деталей типа валов и формирование необходимого качества поверхностного слоя при поверхностном пластическом деформировании.

Цель работы. Создание эффективной технологии отделочно-упрочняющей обработки маложестких валов обеспечивающей повышение качества поверхности при сохранении точности и стабильности геометрической формы.

Задачи исследования:

1. На основе анализа запатентованных и используемых в производстве инструментов для ППД, разработать устройство для обработки нежестких валов с учетом механических свойств поверхностного слоя.

2. Получить аналитические зависимости для расчета конструктивных и конструктивно-технологических параметров центробежного обкатника, обеспечивающие необходимые качественные показатели обработки ППД нежестких валов.

3. Разработать методику расчета технологических параметров обработки нежестких валов центробежным обкатником на основе реальных механических свойств поверхностного слоя.

4. Экспериментально определить механические свойства поверхностного слоя малоуглеродистых сталей используемых для расчета технологических параметров центробежного обкатывания нежестких валов.

5. Провести экспериментальную проверку аналитических зависимостей и методики расчета рациональной величины технологических параметров ППД центробежным обкатыванием малоуглеродистых сталей.

Объект исследования: маложесткие стальные детали типа осей, валов, штанг.

Предмет исследования: качество поверхностного слоя и технологические параметры упрочнения центробежным обкатыванием.

Научная новизна

– Разработаны теоретические положения по проектированию технологического процесса отделочно-упрочняющей обработки нежестких валов, опирающиеся на физические закономерности деформации поверхностного слоя в пределах зоны взаимного влияния.

– Получены аналитические зависимости частоты вращения центробежного обкатника от величины критического напряжения в поверхностном слое мало жестких валов. Использование этих зависимостей обеспечивает создание условий для упрочнения поверхностного слоя в пределах зоны взаимного влияния.

– В результате электромагнитных и механических испытаний поверхностного слоя стержневых деталей установлена количественная зависимость между характеристиками прочности основного металла и зоны взаимного влияния, а также доказана стабильность напряженного состояния по длине упрочненного слоя при центробежном силовом воздействии.

Практическая значимость

– Спроектирована и изготовлена конструкция центробежного обкатника, обеспечивающая стабильную деформацию поверхностного слоя по длине вала. Устройство позволяет обрабатывать изделия с конусностью до 1:8 без дополнительной настройки обкатника.

– Разработана технология поверхностного пластического деформирования нежестких деталей типа валов центробежным обкатыванием.

– Предложена методика расчета рациональных размеров деформирующего инструмента для центробежного обкатывания нежестких деталей.

– Конструкторско-технологические рекомендации по упрочнению мало жестких валов рекомендованы к внедрению на ООО ПО «Усольмаш» при изготовлении длинномерных деталей типа «Ось конвейера».

Достоверность полученных результатов подтверждена обоснованностью принятых допущений, корректностью выбранных методов исследования. Достоверность выводов подтверждается опытом практической реализации результатов исследования.

Апробация работы. Материалы диссертационной работы доложены автором на одиннадцатой международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности» (Санкт-Петербург, 2011 г.), на Всероссийских с международным участием научно-технических конференциях «Жизненный цикл конструкционных материалов» (Иркутск, 2012, 2013 г. г.), ежегодных научно-практических конференциях института авиа-машиностроения и транспорта Иркутского государственного технического университета, на конференциях в рамках международного форума «Инженеры будущего» (Байкал) 2011-2013г.г.

Основные положения выносимые на защиту:

- Технология, обеспечивающая формирование равномерного напряженного состояния по длине мало жесткого вала.
- Методика определения механических характеристик в поверхностном слое упрочненных деталей.
- Методика выбора технологических параметров обработки мало жестких валов в зависимости от исходной микроструктуры материала.
- Усовершенствованная конструкция обкатника, генерирующего деформирующее усилие от центробежного воздействия.

Публикации. Результаты работы отражены в шести публикациях. В журналах рекомендуемого перечня ВАК РФ опубликовано 3 статьи, общим объемом 2 п.л.

Структура и объем работы. Диссертационная работа состоит из введения, четырех глав, общих выводов, библиографического списка, включающего 128 наименований и 2 приложений. Работа изложена на 141 страницах машинописного текста, содержит 51 рисунок и 5 таблиц.

ОСНОВНОЕ СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

Во введении обоснована актуальность выполненной работы. Сформулирована цель, задачи и положения, которые выносятся на защиту.

В первой главе проведен анализ технологических параметров и оснащения влияющих на качество обработки ППД не жестких валов.

Показано, что технологии упрочнения, разработанные для обработки ППД жестких валов не могут быть использованы для обработки мало жестких валов без существенного увеличения жесткости системы СПИД, создания специальных инструментов и оборудования.

Исследованием качества изделий при ППД в России занимались: Басков Л. В., Блюменштейн В. Ю., Димов Ю. В., Драчев О. И., Емельянов В. Н., Зайдес С. А., Исаев А. Н., Киричек А. В., Кропоткина Е. Ю., Матлин М. М., Мураткин Г. В., Папшев Д. Д., Пашков А. Е., Попов М. Е., Проскуряков Ю. Г., Расторгуев Д. А., Рахимьянов Х. М., Смелянский В. М, Суслов А. Г., Тамаркин М. А., Чепя П. А и многие другие исследователи. Их трудами созданы научные основы методов ППД, разработаны рабочие инструменты, установлены оптимальные ре-

жимы упрочнения. Однако из-за поперечных и крутильных колебаний нежестких заготовок любые способы увеличения жесткости экономически малоэффективны. Решение большей части проблем, связанных с динамикой системы станок – деталь решается совершенствованием технологий, при которых заготовка совершает поступательное движение, а инструмент – вращательное. Для этого необходимо развитие теории и практики проектирования вращающегося инструмента с генерацией рабочего усилия центробежными силами. Проектирование технологии ППД нежестких деталей и результат обработки зависят во многом от микроструктуры поверхностного слоя.

В результате литературного обзора была сформулирована цель диссертационной работы, направленная на разработку эффективной технологии упрочнения мало жестких валов.

Во второй главе определены параметры упрочнения с использованием центробежного обкатника. Доказано, что режимы упрочнения зависят не только от содержания углерода в стали, но и от величины зерна в поверхностном слое. Даны аналитические решения по определению конструктивных параметров центробежных обкатников и рациональной частоты их вращения на основе линейной модели изменения механических свойств по толщине поверхностного слоя.

Основными параметрами качества обработки поверхностного слоя нежестких валов являются параметры шероховатости, равномерность упрочнения и равномерность остаточных напряжений по длине вала. Наиболее эффективно эти проблемы решаются с использованием при ППД нежестких валов центробежного обкатника, усовершенствованная конструкция которого показана на рис.1.

Влияние материала заготовки на технологические параметры ППД нежестких валов связано с существованием вблизи свободной поверхности заготовки слоя (зона взаимного влияния), в пределах которого наблюдаются иные за-

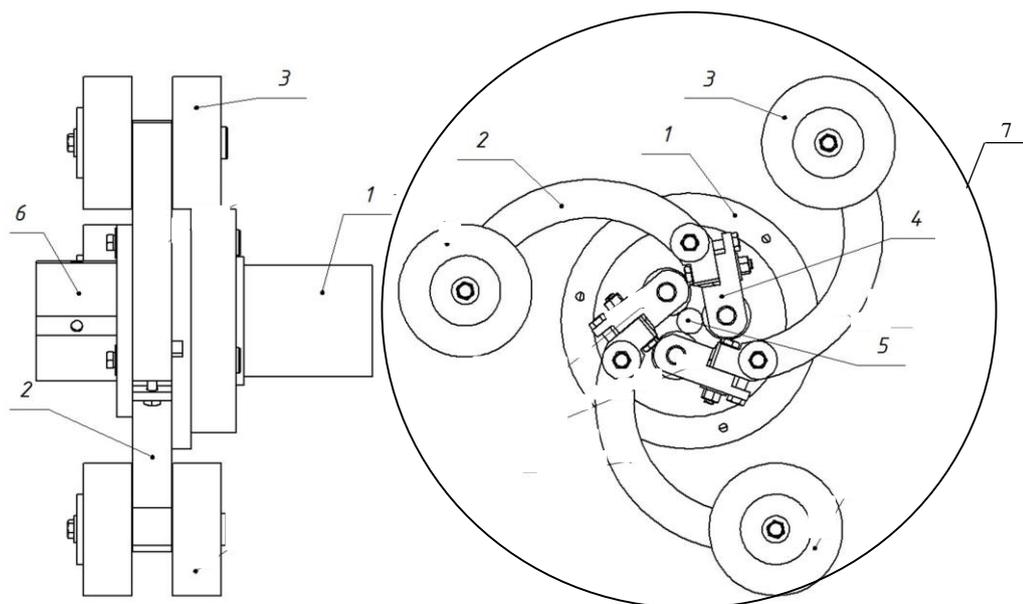


Рис. 1. Конструкция центробежного обкатника. 1 – корпус и лекало; 2 – криволинейный рычаг; 3 – груз; 4 – державка с деформирующим роликом; 5 – обкатываемая деталь; 6 – дополнительная опора; 7 – защитный кожух

кономерности совместной деформации и деформационного упрочнения поликристаллической структуры даже при отсутствии технологической наследственности (рис.2). Толщина этой зоны r_f определяется эмпирическим соотношением:

$$r_f = 25,715d_3^{0.792}, \quad (1)$$

где d_3 – средний размер зерна, мкм

В пределах зоны взаимного влияния при удалении от свободной поверхности напряжение течения (как результат пластической деформации) возрастает от величины много меньшей напряжения течения всего образца до величины равной ему. Изменение происходит с большим градиентом и в первом приближении может быть описано линейной функцией:

$$\sigma_f(r) = a_1 - b_1 r, \quad (2)$$

где $a_1 = \sigma_y + \frac{r_y(\sigma_y - \sigma_f)}{r_f}$; $b_1 = \frac{\sigma_y - \sigma_f}{r_f}$;

σ_y – предел текучести материала образца; σ_f - предел текучести приповерхностного слоя; r_0 – радиус вала.

Выравнивание механических свойств по толщине поверхностного слоя любыми способами, в том числе ППД, сводится к уменьшению разности $\sigma_y - \sigma_f$ путем увеличения σ_f . Упрочнение на глубину более r_f приводит к увеличению σ_y на большую величину чем σ_f . Разность $\sigma_y - \sigma_f$ возрастет, и выравнивание механических свойств поверхностного слоя и основного металла не произойдет.

Усилие прижима роликов к поверхности заготовки пропорционально квадрату частоты вращения центробежного обкатника:

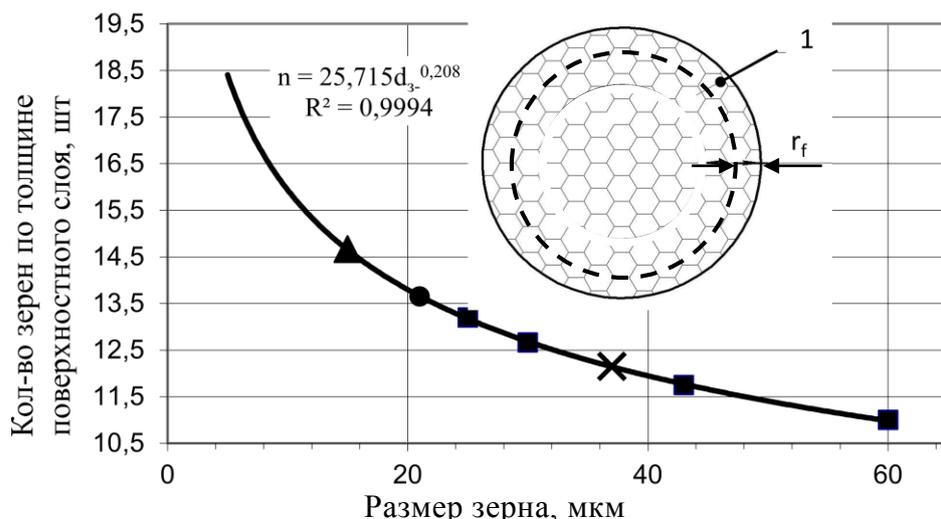


Рис. 2. Зависимость размера зоны взаимного влияния от размера зерна: ■ – армко железо; ▲ – аустенитная сталь с содержанием углерода 1%, ● – сталь 45 с размером зерна 20 мкм, × – сталь 35 с размером зерна 37 мкм; 1 – зона взаимного влияния

$$P_r = (15P_3 + 65)n^2 10^{-5}, \quad (3)$$

где P_3 – сила тяжести груза, Н; n – частота вращения инструмента, об/мин.

Для данного типоразмера центробежного обкатника изменение диаметра обрабатываемого вала более чем в 3 раза не приводит к существенному изменению усилия прижима инструмента, что позволяет обрабатывать детали с конусностью 1:8 без каких-либо затрат времени на настройку инструмента.

Из условия распространения пластической деформации на глубину, не превышающую размер зоны взаимного влияния установлены аналитические зависимости ограничивающие расстояние между опорами, поддерживающими вал при центробежном обкатывании

$$L \leq \sqrt[4]{M_x / ((15P_r + 65)n^2 10^{-5})}, \quad (4)$$

и частоту вращения инструмента

$$n_2 \leq \sqrt{\frac{T 10^5}{0.18d(15P_r + 65)}}, \quad (5)$$

где M_x , T – соответственно изгибающий и крутящий моменты, рассчитанные с учетом пластического течения в поверхностном слое на глубину r_f , Нм; d – диаметр обрабатываемого вала.

Величины крутящего и изгибающего моментов зависят от размера r_f , поэтому проектирование инструмента должно происходить во взаимосвязи с микроструктурой нежесткого вала. Выполнение неравенств, предложенных для выбора основных размеров центробежного обкатника, обеспечивает большую однородность обработки в пределах зоны взаимного влияния.

Рациональная глубина деформационного упрочнения маложестких деталей не должна превышать размеров зоны взаимного влияния, в пределах которой формируется, сохраняется и через которую передается технологическая наследственность.

Получена аналитическая зависимость, позволяющая рассчитать глубину упрочнения h_t в пределах зоны взаимного влияния:

$$h_t = \frac{1}{k} \left(\sqrt{\frac{(15P_3 + 65)n^2 10^{-5}}{\pi \alpha_1 \sigma_n} + \frac{1}{4}(a - b)^2} - \frac{1}{4}(a + b) \right) + t, \quad (7)$$

где P_3 – масса груза, a , b – полуоси эллипса пятна контакта ролика с деталью, $\alpha_1 = 1,4 \dots 1,6$; t – глубина невозстановленной лунки, σ_n – нормальное напряжение в очаге деформации.

Установлена аналитическая зависимость для расчета рациональной частоты вращения центробежного обкатника, обеспечивающей глубину упрочнения равную размеру зоны взаимного влияния:

$$n = 100 \sqrt{\frac{10\pi k_\sigma \alpha_1 \left(\left(k k_d d^{0,792} - t + \frac{1}{4}(a+b) \right)^2 - \frac{1}{4}(a-b)^2 \right)}{(15P_3 + 65)}} \sigma_{кр}, \quad (8)$$

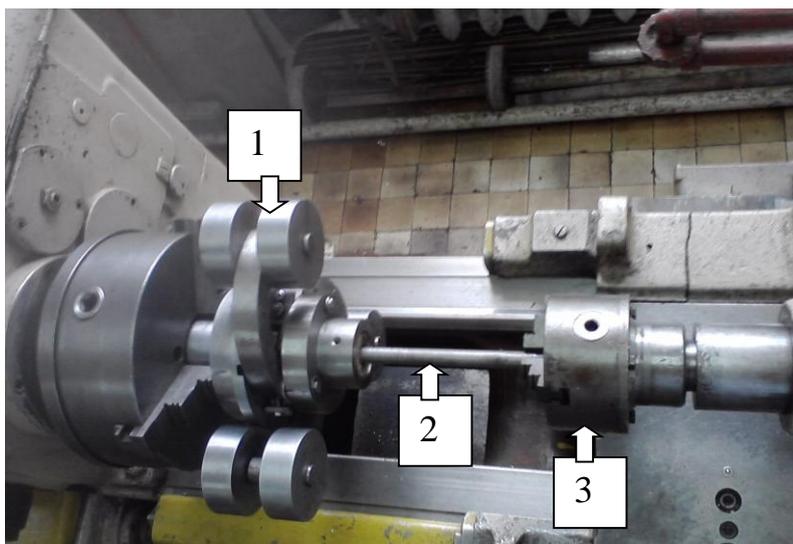


Рис. 3. Общий вид экспериментальной установки со снятым защитным кожухом: 1 – центробежный обкатник; 2 – заготовка; 3 – устройство закрепления заготовки в задней бабке токарного станка 1К62

где $k_d = 0,0257$; $k_\sigma = 2.5 \dots 2.6$; $k = 1 \dots 10$.

При малых нагрузках и большой твердости материала можно пренебречь величинами $\frac{1}{4}(a + b) - t \approx 0$, $\frac{1}{4}(a - b)^2 \approx 0$. Тогда

$$n = k_{\text{общ}} \cdot \sqrt{\frac{d^{1,584}}{15P_3 + 65}} \sigma_{\text{кр}}, \quad (9)$$

где $k_{\text{общ}} = 100 \cdot \sqrt{10\pi k_\sigma \alpha_1 k^2 k_d^2}$

Частота вращения, рассчитанная по формуле (8) не должна превышать предельную частоту вращения (формула 5)

В третьей главе изложены методики экспериментального исследования механических свойств поверхностного слоя, глубины упрочнения, параметров шероховатости, твердости, остаточных напряжений. Описаны экспериментальные установки, используемые в работе.

В качестве объектов исследования выбраны тонкие нежесткие валы из малоуглеродистых сталей, широко используемые в сельскохозяйственном машиностроении, в горной, текстильной промышленности и других отраслях.

Экспериментальная установка для обработки нежестких валов показана на рис.3. Основной частью ее является центробежный обкатник 1, закрепленный в патроне станка 1К62. Обрабатываемая заготовка 2 одним концом закреплена в самоцентрирующемся трехкулачковом патроне 3, другой конец – свободен. Продольная подача заготовки обеспечивается движением задней бабки, скрепленной замковым устройством с суппортом.

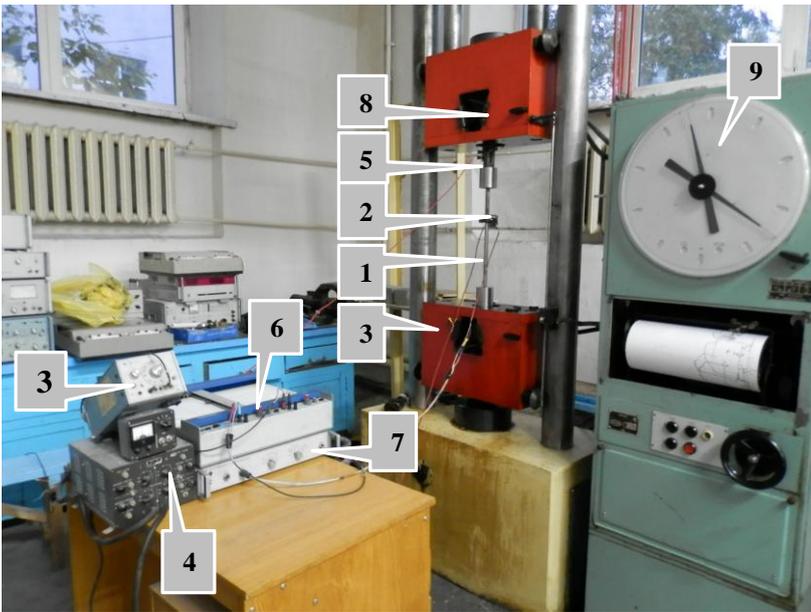


Рис. 4. Экспериментальная установка для исследования механических свойств поверхностного слоя. 1 – образец; 2 – индукционный трансформаторный датчик; 3 – генератор ГЗ-111; 4 – тензоусилитель ТА-5; 5 – датчик нагрузки на образец; 6 – самописец ХУ-4103; 7 - преобразователь В-9; 8 – разрывная машина Р – 50; 9 – блок управления разрывной машины Р- 50

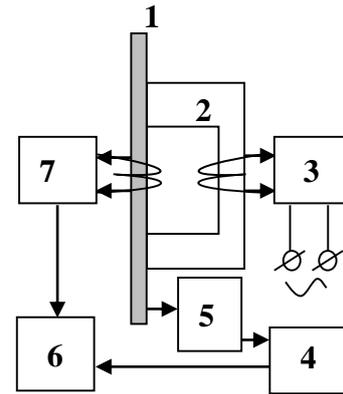


Рис. 5. Блок-схема экспериментальной установки:
1 – образец; 2 – индукционный трансформаторный датчик;
3 – генератор ГЗ-111;
4 – тензоусилитель ТА-5;
5 – датчик нагрузки на образец;

Для исследования механических свойств поверхностного слоя использована экспериментальная установка (рис. 4), принципиальная схема которой показана на рис. 5. По перегибу на электромагнитной диаграмме растяжения образца или заготовки (рис. 6) определено макроскопическое напряжение течения поверхностного слоя σ_{BE} , которое использовалось для расчета механических характеристик поверхностного слоя. Запись изменений напряжения σ_{BE} после электрохимического травливания слоя определенной толщины позволило определять глубину наклепа после центробежного обкатывания. По напряжению σ_{BE} оценивалась равномерность обработки и функциональная зависимость остаточных напряжений от частоты вращения центробежного обкатника. Остаточные напряжения первого рода в поверхностном слое определены с использованием электромагнитной диаграммы растяжения образца и рентгеновским способом.

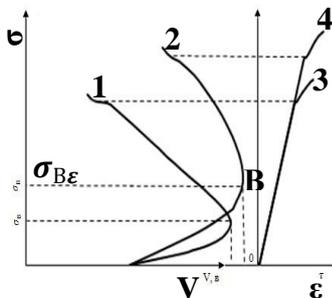


Рис. 6. Электромагнитные (1, 2) и механические (3, 4) диаграммы растяжения образцов

Величина остаточного макроскопического напряжения пропорциональна электрическому напряжению во вторичной обмотке датчика после полной разгрузки образца.

Границы зерен микроструктуры выявляли спиртовым 4% раствором азотной и пикриновой кислот. Средний размер зерна определяли по количеству пересечений границ зерен с произвольной секущей, с помощью металлографического микроскопа ММУ-3 и двухлучевого сканирующего микроскопа (многолучевая система) ЛВ-4500.

Измерение шероховатости поверхности заготовок до ППД и после обкатки центробежным обкатником производили с использованием стандартизованной методики на приборе Абрис ПМ 7. Остаточные напряжения в поверхностном слое определяли на рентгеновском анализаторе напряжений Xstress 3000G3/G3R.

В четвертой главе изложены результаты экспериментального определения рациональных параметров упрочнения малоуглеродистых валов и результаты исследования качественных показателей поверхностного слоя при центробежном обкатывании.

Для всех исследованных малоуглеродистых сталей существует критическое напряжение $\sigma_{кр}$ и соответствующее ему критическая деформация $\epsilon_{кр}$, после которой поверхностный слой практически не упрочняется или упрочняется с малой интенсивностью (рис.7). До напряжения $\sigma_{кр}$ интенсивность упрочнения поверхностного слоя много меньше, чем образца в целом.

Экспериментальные данные по величине $\sigma_{кр}$ малоуглеродистых сталей с размером зерна 25-30 мкм аппроксимированы линейной зависимостью:

$$\sigma_{кр} = 229,1C + 127,6, \quad (10)$$

где C – содержание углерода в стали, %.

Величина критической деформации для малоуглеродистых сталей колеблется в интервале от 3 до 5% относительной остаточной деформации.

В поверхностном слое при любой величине пластической деформации пластическое течение начинается при напряжении 1,5 – 2 раза меньше напряжения течения образца.

Основные параметры качества ППД формируемые центробежным обкатыванием исследованы экспериментально. Для оценки шероховатости использованы четыре параметра: среднее арифметическое отклонение профиля R_a , сред-

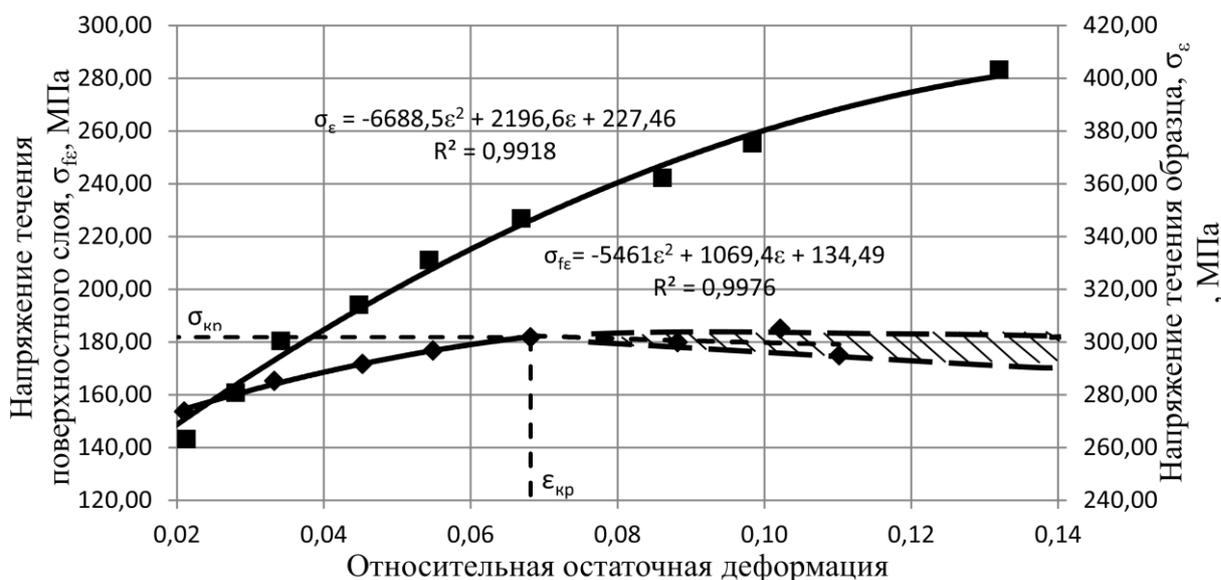


Рис. 7. Кривые деформационного упрочнения стали 25: ◆ – поверхностный слой; ■ – образец в целом

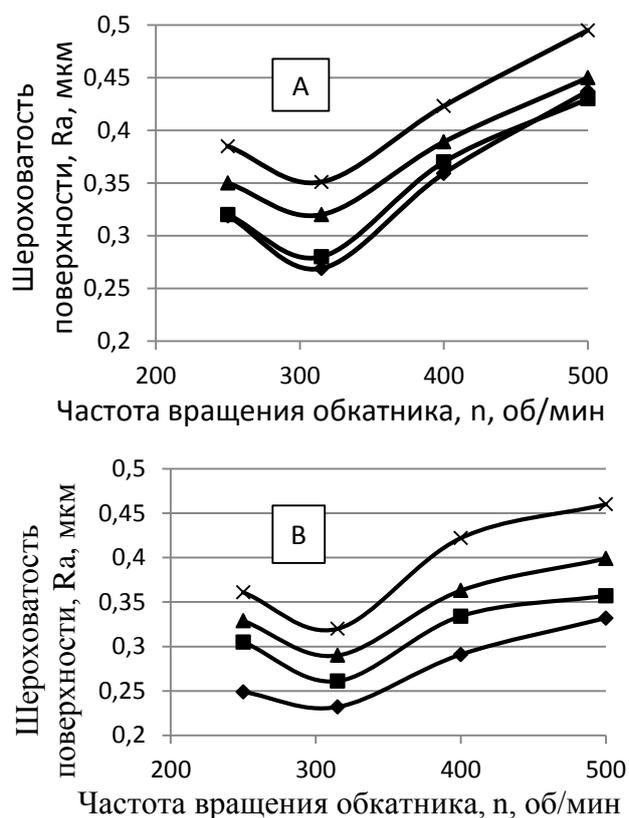


Рис. 8. Зависимость шероховатости от частоты вращения обкатника при разной продольной подаче: \blacklozenge - $S_m=0,07$ мм/об, \blacksquare - $S_m=0,11$ мм/об, \blacktriangle - $S_m=0,15$ мм/об, \times - $S_m=0,21$ мм/об.

Начальная шероховатость:
А - R_a - 5,0 мкм, В - R_a - 1,25 мкм

сравнению с исходной шероховатостью эти параметры уменьшились соответственно в 33 раза и 10 раз (рис. 8). Обработка с частотой вращения выходящей за пределы оптимального интервала приводит к формированию вторичной (наведенной) шероховатости, наблюдается отслоение (выкрашивание) с поверхности. Средний шаг неровностей увеличивается в 3,5 раза, а высота неровностей по 10 точкам в 5 раз (рис. 9).

Глубина упрочнения поверхностного слоя при центробежном обкатывании монотонно возрастает с увеличением числа оборотов (рис. 10, кривая 1). В исследованном диапазоне шероховатостей (5-1,25 мкм) минимальная шероховатость поверхности заготовок из стали 35 с размером зерна 30 мкм наблюдалась при частоте вращения 315 об/мин., которой соответствует глубина упрочнения около 400 мкм. Эта величина близка к толщине ослабленного поверхностного слоя (размеру зоны взаимного влияния).

Размер шероховатости существенно не изменяется по сравнению с оптимальной при уменьшении глубины упрочнения почти в 2 раза (рис. 10).

Этот экспериментальный факт позволяет утверждать, что рациональные технологические параметры обработки ППД нежестких деталей следует искать вблизи границы зоны взаимного влияния.

ний шаг неровностей S_m , распределение опорных линий по уровням t_p , коэффициент несущей способности $K = S_m/R_a$. Результаты эксперимента полученные после обработки профилограмм представлены на рис. 8-10.

С увеличением частоты вращения обкатника происходит трансформация исходных микронеровностей. При частоте вращения 250 об/мин и подаче близкой к оптимальной, наблюдалось «смятие» вершин профиля с одновременным увеличением радиусов закруглений и углов при его вершине. Высота неровностей профиля по десяти точкам уменьшилась в 40,5 раза, средний шаг неровностей профиля - в 6 раз. В интервале частот вращения от 315 до 400 оборотов в минуту формировалась шероховатость с минимальным отклонением микропрофиля от средней линии и минимальным средним шагом неровностей. По

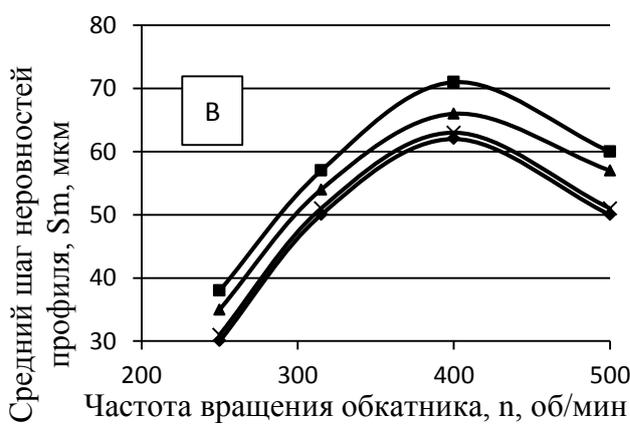
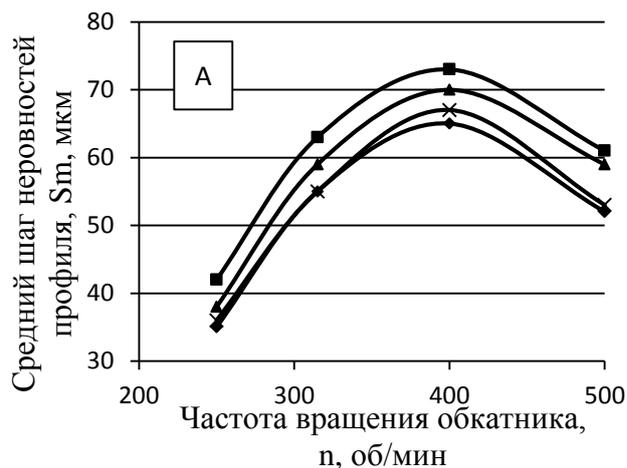


Рис. 9. Зависимость среднего шага неровностей профиля от частоты вращения обкатника при продольной подаче: \blacklozenge - $S=0,07$ мм/об, \times - $S=0,11$ мм/об, \blacktriangle - $S=0,15$ мм/об, \blacksquare - $S=0,21$ мм/об. Начальная шероховатость: А - $Ra=5.0$ мкм, В - $Ra=2.5$ мкм

обкатывании более 6 мм приводит к существенному увеличению нагрузки на ролик и увеличению глубины упрочнения за пределы границы зоны взаимного влияния. Обобщая результаты полученные из анализа формулы (11), можно определить интервал изменения отношения $r_{пр}/a$ для нежестких деталей в пределах от 1,5 до 2. При размере зерна около 30 мкм этому интервалу соответствует профильный радиус ролика в пределах от 3 до 8 мм.

Уменьшение профильного радиуса приводит к увеличению шероховатости обрабатываемой центробежным обкатником поверхности заготовки (рис. 11). Чем больше исходная шероховатость, тем больше шероховатость после центробежного обкатывания.

Для нежестких валов глубина упрочнения ограничена размером зоны взаимного влияния, величиной критического напряжения и деформации, однозначно определяемых для данного материала. При наличии названных ограниче-

Шероховатость обкатываемой поверхности зависит также от величины профильного радиуса ролика, который может быть рассчитан по формуле:

$$r_{пр} = a^{2,2} \sqrt{\frac{h_s^4 A^{1,8}}{\epsilon_{кр}^3}}, \quad (11)$$

где $a = 3,1^{1,1} \sqrt{k_{общ}}$ - величина постоянная; где $A = \frac{1}{D_B} + \frac{1}{D_p}$, D_B - диаметр заготовки; D_p - диаметр ролика, h_s - глубина распространения пластической деформации, $k_{общ}$ - коэффициент учитывающий все поправочные коэффициенты.

Размер профильного радиуса зависит от величины критической деформации, размера зоны взаимного влияния, диаметра заготовки и диаметра ролика. С увеличением критической деформации поверхностного слоя зерен уменьшается величина профильного радиуса. При критической деформации более 8% величина профильного радиуса ролика практически не зависит от диаметра заготовки;

Увеличение профильного радиуса ролика при центробежном

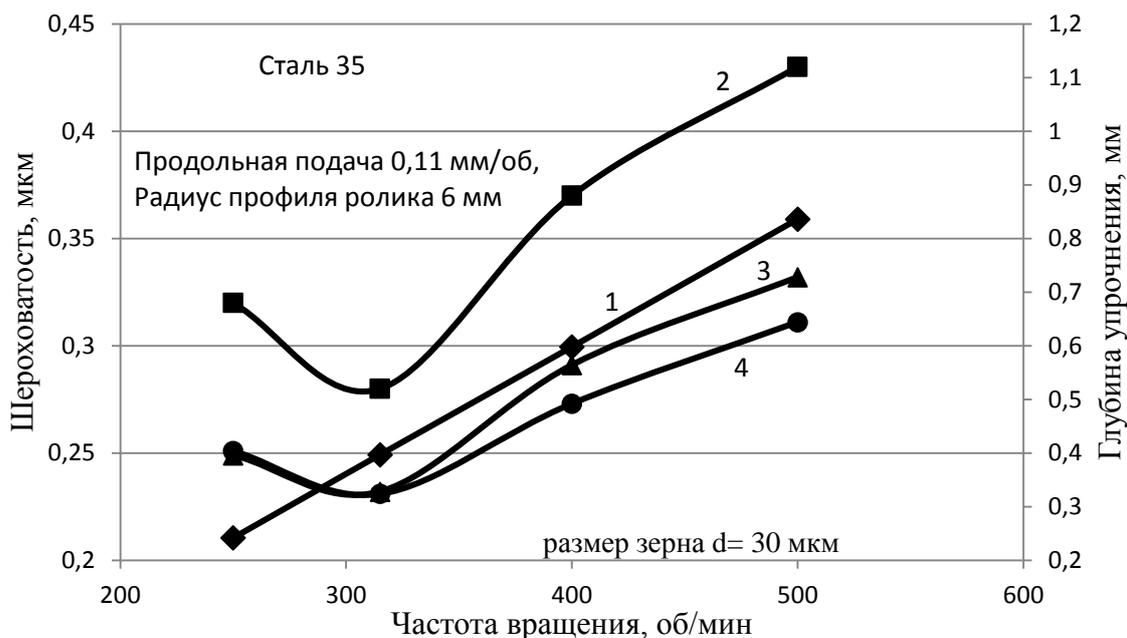


Рис. 10. Зависимость глубины упрочнения (1) и шероховатости поверхности вала (2, 3, 4) от частоты вращения центробежного обкатника: ■ - исходная шероховатость $R_a - 5,0$ мкм; ▲ - исходная шероховатость $R_a - 1,25$ мкм; ● - исходная шероховатость $R_a - 2,5$ мкм; × - глубина упрочнения определенная из эксперимента

ний величина усилия прижима ролика и величина профильного радиуса определяются из достаточно узкого диапазона их значений. Это приводит к тому, что величина подачи, обеспечивающая необходимый интервал значений шероховатости в значительной степени зависит от исходной шероховатости поверхности заготовки (рис. 11). Для проверки этого предположения проведены эксперименты на образцах из стали 35. Обработка результатов позволила получить зависимость продольной подачи от исходной и получаемой после обработки центробежным обкатником шероховатости:

$$-S_m^p = \Psi R_{ak} - \Omega, \quad (12)$$

Где S_m^p - продольная подача, мм/об; R_{ak} - шероховатость обкатанной поверхности, мкм; $\Psi = 0,092R_{ai}^2 - 0,614R_{ai} + 2,357$; $\Omega = 0,025R_{ai}^2 - 0,167R_{ai} + 0,517$; R_{ai} - исходная шероховатость поверхности заготовки, мкм.

Теоретические и экспериментальные результаты, полученные в работе, позволяют выбрать технологические параметры центробежного обкатывания. Вначале определяется средний размер зерна микроструктуры, выбирается масса груза в пределах от 0,5 кг до 2 кг, по формуле (10) рассчитывается критическое напряжение. Рациональная частота вращения центробежного обкатника определяется по формулам (8), (9). Если рассчитанная частота вращения меньше минимальной частоты вращения шпинделя станка, то следует уменьшить массу груза.

Для расчета величины продольной подачи необходимо определить из конструктивных соображений допустимый интервал изменения шероховатости об-

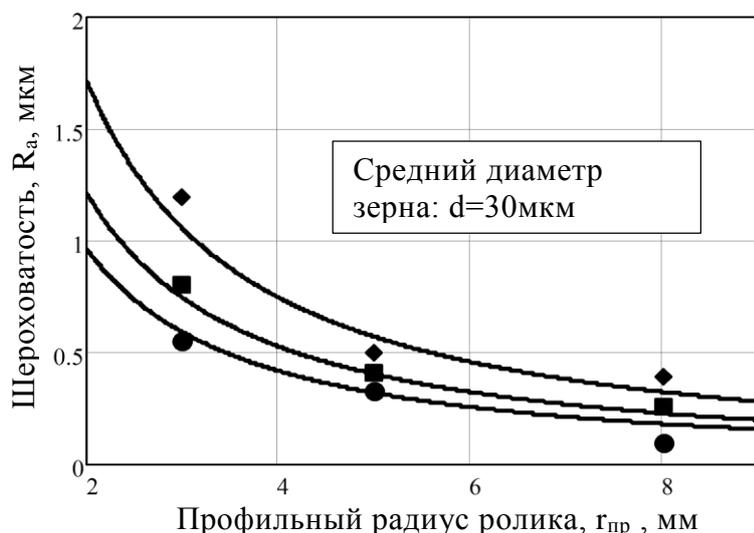


Рис. 11. Шероховатость поверхности после обкатывания с разной начальной шероховатостью образцов. \blacklozenge – $R_a=5$ мкм, \blacksquare – $R_a=2,5$ мкм, \bullet – $R_a=1,25$ мкм. Частота вращения обкатника $n=500$ об/мин, подача на оборот $S_m=0,11$ мм/об, диаметр ролика $d_p=30$ мм, диаметр заготовки $d_b=16$ мм

катанной поверхности, определяемый, прежде всего, точностью исполнения сопрягаемых поверхностей. Из анализа технологии обработки заготовки предшествующей центробежному обкатыванию прогнозируется исходная шероховатость поверхности заготовки. Рациональную величину продольной подачи рассчитывают по формуле (12).

Основные параметры упрочнения мало жестких валов центробежным обкатыванием представлены в таблице. Эк-

периментальная проверка методики расчета технологических параметров показала удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных данных.

Таблица

Сравнение расчетных и экспериментальных величин технологических параметров

Параметры упрочнения	Малоуглеродистые стали			
	Сталь 15	Сталь 25	Сталь 35	Сталь 45
Твердость до обработки, НВ	177	178	191	229
Размер зерна, мкм	30-32	25-30	27-32	28-33
Размер зоны взаимного влияния, мкм	380-400	330-380	350-400	360-410
Глубина упрочнения, мкм	Расчет	380-400	330-380	350-400
	эксперимент	390	350	410
Масса груза, кг	2	2	2	2
Частота вращения, об/мин	расчет	300-315	290-320	300-330
	эксперимент	315	315	315
Величина подачи мм/об	расчет	0,10-0,13	0,10-0,12	0,10-0,12
	эксперимент	0,11	0,11	0,11
Диаметр ролика, мм	40	40	40	40
Размер профильного радиуса, мм	расчет	4...7	4...7	3...6
	эксперимент	5	5	5

Важными показателями качества обработки нежестких валов является равномерность упрочнения и связанная с ней равномерность распределения остаточных напряжений по длине вала. Изменение кинематики упрочнения обработки существенно повлияло на условия формирования остаточных напряжений в поверхностном слое.

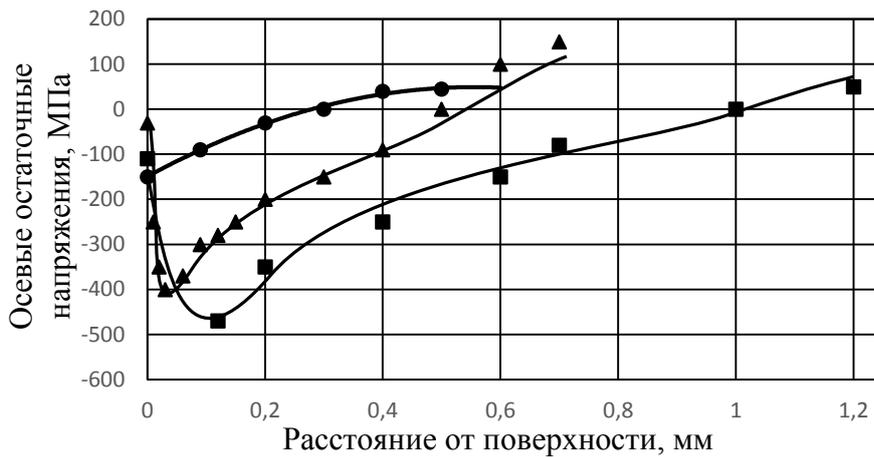


Рис. 12. Изменение осевых остаточных напряжения по глубине ПС при различной частоте вращения обкатника.
 ● – 200 об/мин, ▲ – 315 об/мин, ■ – 500 об/мин.
 Сталь 35 с размером зерна 30 мкм. Ролик с профильным радиусом 5 мм, подача 0,11мм/об, масса груза 2 кг.

ния течения поверхностного слоя $\sigma_{в\epsilon}$ (рис. 12, 13 и 14) и по результатам рентгеноструктурного измерения (рис. 13, точки ▲). Наиболее интенсивно остаточные напряжения и $\sigma_{в\epsilon}$ повышаются при увеличении частоты вращения обкатника до 330 об/мин. Затем интенсивность роста существенно уменьшается. При массе груза 2 кг этой частоте соответствует глубина упрочнения близкая к размеру зоны взаимного влияния. Такие же результаты получены на других сталях. При напряжении $\sigma_{в\epsilon}$ в поверхностном слое начинается микропластическое течение в результате которого происходит релаксация остаточных напряжений. Чем больше это напряжение, тем больше релаксационная стойкость. На рис. 14 показано изменение $\sigma_{в\epsilon}$ по длине нежесткого вала после обработки одним роликом и центробежного обкатывания. Центробежная обкатка существенно уменьшила неоднородность распределения напряжений течения поверхностного слоя по длине вала.

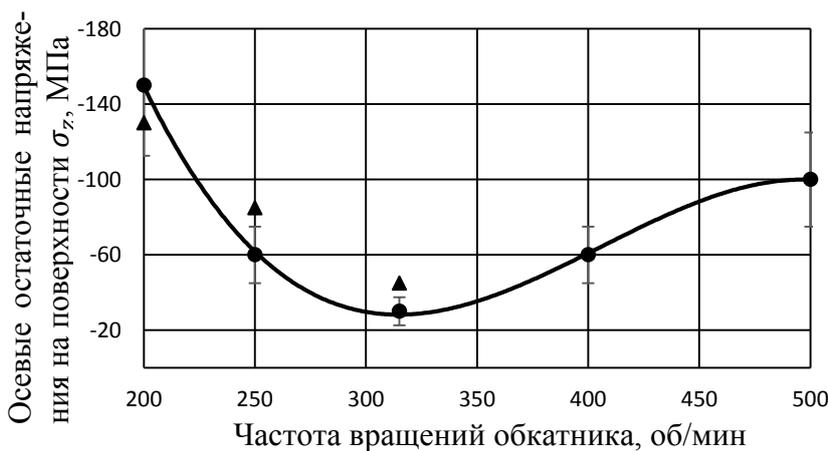


Рис. 13. Зависимость осевых остаточных напряжений (σ_z) на поверхности от частоты вращений обкатника.
 ● – определены электромагнитным способом, ▲ – определены рентгеновским способом. Сталь 35 с размером зерна 30 мкм. Ролик с профильным радиусом 5 мм, подача 0,11мм/об, масса груза 2 кг.

Наибольшее значение в обеспечении стабильности геометрических параметров обработанной ППД заготовки имеют продольные остаточные напряжения, их величина и распределение по длине заготовки. Их изменение оценивали по величине макроскопического напряже-

ния течения поверхностного слоя по длине вала.

Степень упрочнения образцов оценивали по изменению микротвердости и твердости по Бринеллю (рис. 15-16). Твердость НВ на поверхности интенсивно возрастает пока глубина упрочнения не приблизится к границе зоны взаимного влияния. Затем рост твердости существенно замедляется. Изучение микротвердости по глубине

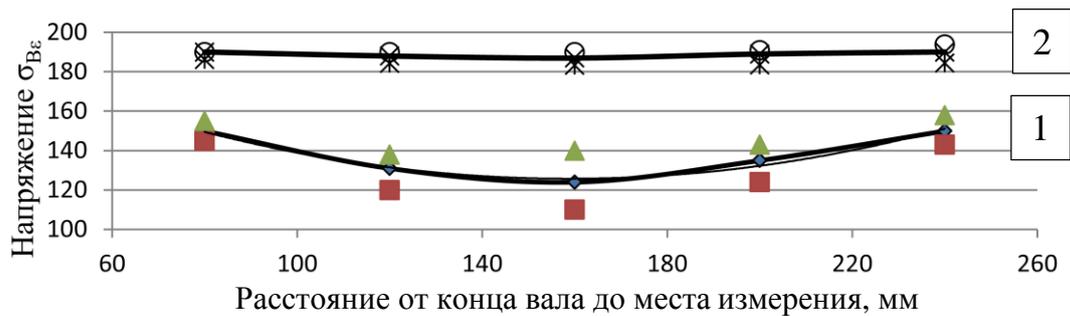


Рис. 14. Изменение напряжения $\sigma_{B\epsilon}$ по длине образца. 1 – Образец после обработки одним роликом, 2 – образец после центробежного обкатывания роликом. Сталь 45, нормализация. Ролик с профильным радиусом 5 мм, подача 0,11мм/об, масса груза 2 кг. размер зерна 30 мкм.

поверхностного слоя показало, что при частоте вращения меньше 200 об/мин максимум твердости лежит на или вблизи свободной поверхности. При дальнейшем увеличении частоты вращения максимум твердости смещается в глубину.

Центробежная обкатка обеспечивает достаточную однородность упрочнения и может существенно изменить неоднородности предшествующей обработки точением, если глубина их распространения не превышает размеров зоны взаимного влияния.

Таким образом, экспериментальные исследования выявили достаточно высокую эффективность обработки малогабаритных валов центробежным обкатыванием. Установлено, что при упрочнении, например, стали 35 в поверхностных слоях формируются остаточные напряжения сжатия, максимальная величина которых достигает 400-450 МПа; глубина упрочненного слоя составляет 0,1-0,2 мм, твердость повышается на 50-55%, исходная шероховатость R_a снижается в 10-25 раз.

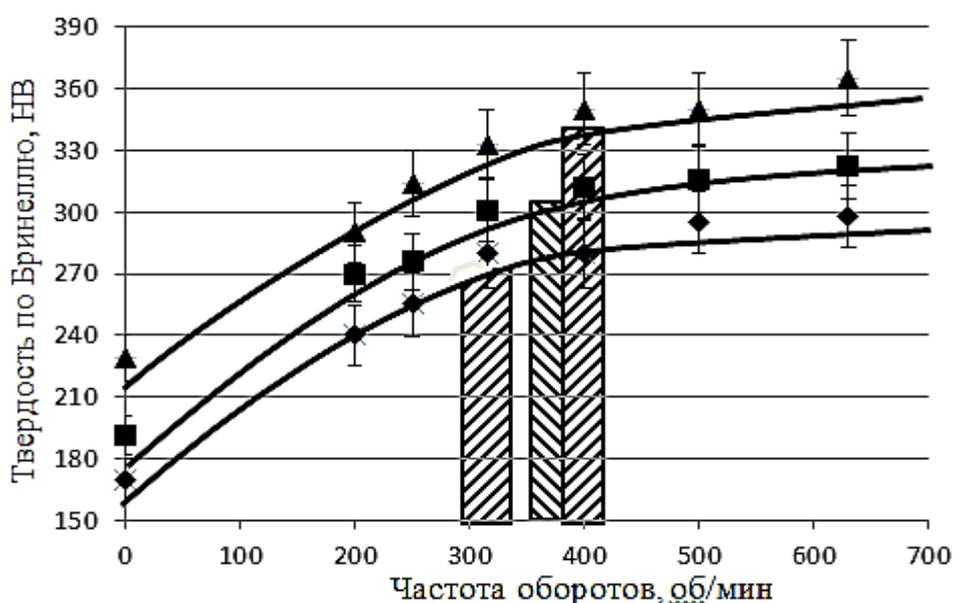


Рис. 15. Зависимость твердости по Бринеллю от частоты вращения обкатника. \blacklozenge – сталь 25, \blacksquare – сталь 35, \blacktriangle – сталь 45.

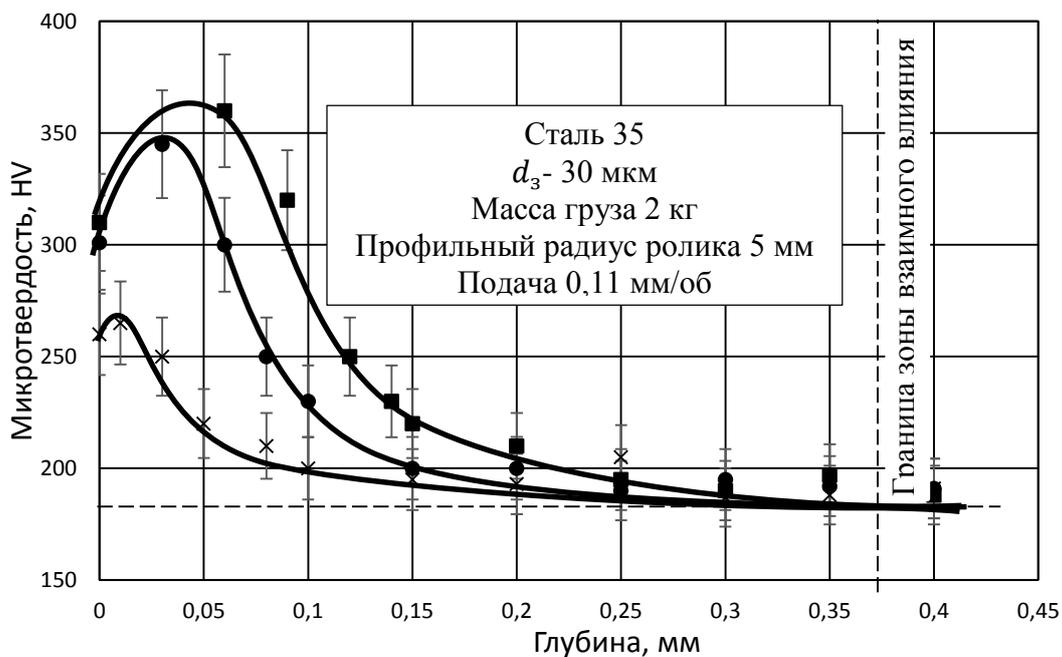


Рис. 16. Зависимость микротвёрдости от глубины упрочненного слоя.

Частота вращения обкатника • – 315 об/мин; ■ – 400 об/мин; × – 200 об/мин

По результатам работы сформированы рекомендации по отделочно-упрочняющей обработке группы длиномерных деталей типа «Ось конвейера» изготавливаемые на ООО ПО «Усольмаш». Например, при изготовлении оси чешуйчатого элеватора шероховатость поверхности R_a получаемая после операции шлифования должна быть в пределах 0,32 – 0,30 мкм. Использование технологии центробежного обкатывания роликом позволила получить шероховатость 0,26 – 0,3 мкм, и упрочнение поверхностного слоя, увеличивающее долговечность детали. Ожидаемый годовой экономический эффект составляет 264 тыс. руб.

ОСНОВНЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ И ВЫВОДЫ

Качество обработки ППД центробежным обкатником нежестких валов зависит от размеров и свойств зоны взаимного влияния, толщина которой зависит от среднего размера зерна микроструктуры. Неоднородность свойств этого приповерхностного объема, особенности его пластической деформации определяют результат отделочно-упрочняющей обработки.

1. Разработана конструкция центробежного обкатника, обеспечивающая неизменность рабочего усилия, стабильность деформации и напряжений по длине заготовки при изменении диаметра вала в 3 раза.

2. Разработан аналитический аппарат для расчета конструктивно-технологических параметров центробежного обкатника, обеспечивающего необходимые качественные показатели обработки ППД нежестких валов.

3. Определены механические свойства поверхностного слоя малоуглеродистых сталей, используемых для расчета технологических параметров центробежного обкатывания.

4. Установлена, теоретически и экспериментально подтверждена рациональная глубина упрочнения поверхностного слоя нежестких валов при отделочно-упрочняющей обработке ППД. Она не должна быть больше размера зоны взаимного влияния.

5. Разработана и экспериментально проверена методика расчета технологических параметров обработки нежестких валов центробежным обкатником, учитывающая особые механические характеристики и закономерности деформационного упрочнения поверхностного слоя.

6. Экспериментально установлены качественные показатели поверхностного слоя, упрочненного центробежным обкатыванием: исходная шероховатость R_a снижается в 10-25 раз, глубина упрочненного слоя составляет 0,1-0,2 мм, твердость возрастает на 50-55 %, в поверхностных слоях формируются осевые остаточные напряжения сжатия величиной 400-450 МПа.

7. Разработаны рекомендации по выбору рациональных параметров отделочно-упрочняющей обработки деталей типа «ось конвейера» на ОАО ПО «Усольмаш». Ожидаемый экономический эффект от внедрения разработанных технологических рекомендаций составляет 264 тыс. руб. в год.

Основное содержание диссертации изложено в следующих публикациях:

В изданиях, входящих в перечень ВАК:

1. Горбунов А.В., Горбунов В.Ф. Закономерности деформационного упрочнения поверхностного слоя стали 25 // Вестник ИрГТУ, №6, 2011. – с. 50-52.

2. Горбунов А.В., Горбунов В.Ф. Обоснование глубины упрочнения нежестких валов при поверхностной пластической деформации центробежным обкатником // Вестник ИрГТУ, №9, 2012 г. - с. 29-33.

3. Вулых Н.В., Горбунов А.В. Центробежное обкатывание нежестких валов для достижения минимальной шероховатости и максимальной несущей способности поверхности // Вестник ИрГТУ, №10, 2012. - с. 34-39.

В прочих изданиях:

4. Горбунов А.В., Горбунов В.Ф. Сопротивление пластическому деформированию круглых валов при изгибе с учетом особых свойств поверхностного слоя / Межвуз. сб. научн. тр. под ред. С.А.Зайдеса. – Иркутск: Из-во ИрГТУ, 2010. – с. 25-38.

5. Горбунов В.Ф., Зайдес С.А., Горбунов А.В. Деформационное упрочнение поверхностного слоя армко-железа / Высокие технологии, образование, промышленность. Т.1: сборник статей Одиннадцатой международной научно-практической конференции «Фундаментальные и прикладные исследования, разработка и применение высоких технологий в промышленности» 27-29 апреля 2011 г., Санкт - Петербург, Россия / под ред. А.П.Кудинова. – СПб: Изд-во Политехнического ун-та, 2011. – с. 156-159.

6. Вулых Н.В., Горбунов А.В., Сташевская К.В. Обработка нежестких валов центробежным обкатываем для достижения оптимальной шероховатости / Жизненный цикл конструкционных материалов (от получения до утилизации): материалы докладов 2 Всеросс. с международным участием науч.-техн. конф. (Иркутск, 25-27 апреля, 2012 г.) / под. ред. С.А.Зайдеса. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2012. – с. 236-242.

Подписано в печать 15.11.2013. Формат 60×90/16.
Бумага офсетная. Печать цифровая. Усл. печ. л. 1,25.
Тираж 100 экз. Зак. 174. Поз. Плана 10н

Лицензия ИД № 06506 от 26. 12. 2001
Иркутский государственный технический университет
664074, Иркутск, ул. Лермонтова, 83