

УДК 621.7.011.+621.9.011  
DOI: 10.12737/20138

**С.А. Зайдес**, д.т.н.  
(Иркутский национальный исследовательский технический университет,  
Россия, 664074, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83),  
**А.В. Горбунов**, к.т.н.  
(АО «ИркутскНИИХиммаш», г. Иркутск)  
E-mail: zsa@istu.edu

## Научно обоснованное определение оптимальных параметров качества поверхностного слоя мало жестких валов при центробежном обкатывании

*Рассмотрен поверхностный слой и глубина наклепа как основные параметры, обеспечивающие качество валов малой жесткости. Установлена величина зоны взаимного влияния, зависящая от размера зерна, которая является критерием для назначения глубины упрочненного слоя. Приведены экспериментальные результаты по определению основных параметров качества поверхностного слоя при упрочнении на глубину зоны взаимного влияния.*

**Ключевые слова:** поверхностный слой; зона взаимного влияния; глубина упрочнения; остаточные напряжения; твердость.

**S.A. Zaides**, D.Eng.  
(Irkutsk National Research Technical University,  
83, Lermontov Str., Irkutsk, 664074 Russia)  
**A.V. Gorbunov**, Can.Eng.  
(“IrkutskSRIChemmach”, Irkutsk)

## Scientifically substantiated definition of quality optimum parameters for surface layer low-rigid shafts at centrifugal running in

*A surface layer and a cold-hardening depth as basic parameters ensuring quality of low-rigid shafts are analyzed. A value of an interference area depending on a grain size which is a criterion for the definition of strengthened layer depth is established. The experimental results on the definition of quality basic parameters for a surface layer at the strengthening for the depth of an interference area are shown.*

**Keywords:** surface layer; interference area; strengthening depth; residual stresses; hardness.

Валы малой жесткости применяют в транспортных системах, металлорежущих станках, горнодобывающей и сельскохозяйственной технике, в разнообразных технологических устройствах и механизмах. Для экономии металла и снижения массы конструкций длинномерные валы стремятся изготовить более легкими, уменьшая размер поперечного сечения. Таким образом, длинномерные детали обычно оказываются и мало жесткими, легко теряют устойчивость при действии продольных сил или имеют низкую изгибную жесткость при поперечном нагружении.

Валы малой жесткости вызывают проблемные ситуации не только при эксплуатации, но и при изготовлении. Основная причина технологических трудностей заключена в центробежных силах, возникающих при вращении заготовок. В процессах механической обработки центробежные силы не позволяют обес-

печить стабильность диаметрального размера по длине изделия и стабильность напряженного состояния в объеме тела, которое оказывает непосредственное влияние на изменение геометрической формы мало жестких деталей.

Для устранения отрицательных явлений предложено изменить кинематику упрочняющей обработки и центробежные силы, оказывающее отрицательное воздействие на заготовку, использовать в положительном направлении, создавая необходимое деформирующее усилие на рабочий инструмент. Вращательное движение заготовки заменено на поступательное перемещение относительно осевой линии, а деформирующий инструмент в виде трех роликов, закрепленных на рычажной системе, получил вращательные движения, благодаря которому под действием центробежных сил рабочий инструмент воздействует на поверхность заготовки и деформирует металл [1].

Одним из показателей качества поверхностного слоя деталей машин является глубина упрочненного слоя, которая связана с основными параметрами обработки: степенью деформационного упрочнения, величиной и глубиной залегания остаточных напряжений сжатия, шероховатостью и твердостью обработанной поверхности.

Для жестких валов, у которых отношение длины вала  $l$  к его диаметру  $d$  меньше 10, обычно рекомендуется увеличивать глубину упрочнения, не допуская разрушения в связи с исчерпанием пластичности материала (шелушение, расслоение). Увеличение глубины упрочнения сопровождается, как правило, повышением интенсивности контактных давлений и возрастанием усилия прижима инструмента к заготовке. При этом в поверхностном слое (ПС) формируются остаточные напряжения сжатия. При последующей эксплуатации при циклических нагрузках эти напряжения частично и неоднородно релаксируют [2], создавая в поперечных сечениях вала изгибающий момент, изменяющий кривизну его оси.

Из этого следует, что необходимо уменьшать величину остаточных напряжений, а это равнозначно уменьшению глубины упрочнения. Шероховатость тоже неоднозначно зависит от глубины упрочнения, она может как повышаться, так и уменьшаться после деформирующей обработки.

Таким образом, необходимо назначить глубину упрочненного слоя, которая бы обеспечивала необходимые качественные характеристики изготавливаемой детали. Цель данной работы состоит в обосновании глубины упрочненного слоя при обработке мало жестких валов центробежным обкатыванием. Рассмотрим основные параметры, которые необходимо учитывать при назначении глубины пластически деформированного слоя мало жестких валов.

#### Поверхностный слой и его величина.

Поверхностный слой любого изделия чаще всего является ответственной зоной, которая воспринимает внешние воздействия – силовые, химические, температурные и др. На внешней поверхности обычно возникают дефекты и повреждения, от которых зависит надежность и долговечность машин и механизмов. При обработке мало жестких деталей к поверхностному слою предъявляют дополнительные требования, так как именно в нем зарождается первоначальная пластическая деформация, снижающая эффективность механической обработки.

При исследовании закономерностей деформации не жестких деталей, изготовленных из поликристаллических многофазных материалов, возникает необходимость изучения особенности взаимодействия зерен и фаз в приповерхностном объеме, отказавшись от весьма упрощенной модели изотропного однородного континуума.

Влияние свободной поверхности и зерен друг на друга распространяется на некоторое расстояние, которое можно назвать зоной взаимного влияния – это часть поликристаллического тела, прилегающая к свободной поверхности, в пределах которой на взаимосвязанную деформацию зерен оказывает влияние свободная поверхность. Слой, прилегающий к свободной поверхности тела, толщина которого равна размеру зоны взаимного влияния, называется поверхностным слоем.

Накопленный технологический опыт показывает, что в некоторых случаях, например при обработке мало жестких изделий, технолог должен уделять особое внимание поверхностному слою, так как от его состояния зависят геометрические показатели качества и физико-механические свойства деталей машин.

Исследования [3, 4], проведенные на различных углеродистых сплавах, позволили установить закономерности изменения толщины зоны взаимного влияния. Экспериментально доказано, что размер зоны взаимного влияния свободной поверхности зависит от размера зерна.

С увеличением размера зерна количество зерен, вовлеченных в совместную деформацию, уменьшается при одновременном увеличении расстояния, на котором оно проявляется. В мелкозернистых материалах ( $d_3 = 1...5$  мкм) размер зоны не превышает 25...90 мкм.

Экспериментальные данные [3, 4] хорошо описывает кривая:

$$n_3 = 25,715 d_3^{-0,208}, \quad (1)$$

где  $n_3$  – число зерен в пределах толщины зоны взаимного влияния;  $d_3$  – размер зерна, мкм.

Главная особенность объема, прилегающего к свободной поверхности, – это неоднородность напряжения течения по толщине слоя. Многочисленными исследованиями [4, 5 и др.] доказано, что течение приповерхностного объема различных конструкционных материалов происходит при напряжении много меньших предела текучести всего образца.

Чем дальше слой находится от свободной поверхности, тем больше его предел текучести.

Напряжение течения (предел текучести) изменяется по радиусу цилиндрического образца по кривой, показанной на рис. 1, которую в первом приближении можно заменить прямой линией (пунктир) [3]:

$$\sigma_{f(r)} = \sigma_f + \frac{r_B(\sigma_y - \sigma_f)}{\Delta} - \frac{r(\sigma_y - \sigma_f)}{\Delta}, \quad (2)$$

где  $\sigma_f$  – предел текучести приповерхностного слоя;  $\sigma_y$  – предел текучести образца;  $\Delta$  – толщина поверхностного слоя;  $r_B$  – радиус окружности;  $r$  – текущий радиус.

$$\Delta = n_3 d_3. \quad (3)$$

С учетом формулы (1):

$$\Delta = 25,715 d_3^{-0,208} d_3^1 = 25,15 d_3^{0,792}. \quad (4)$$

Подставляя в (2) формулу (4), получим

$$\sigma_{f(r)} = \sigma_f + \frac{(\sigma_y - \sigma_f)}{25,715 d_3^{0,792}} (r_B - r). \quad (5)$$

По формуле (5) можно определить напряжение течения в произвольной глубине поверхностного слоя в зависимости от диаметра зерна.

Обычно размер зерна в валах изменяется от 20 до 200 мкм. Поверхностный слой занимает от 5 до 75 % площади поперечного сечения. Имеет место неоднородность механических свойств по поперечному сечению детали еще до поверхностного пластического деформирования (ППД). Чтобы ее уменьшить, необходимо увеличить  $\sigma_f$  и уменьшить размер зерна в пределах толщины поверхностного слоя. Сделать это можно различными методами, в том числе ППД. Упрочнение маложестких валов, очевидно, не должно распространяться на глубину большую, чем толщина поверхностного слоя  $\Delta$ .

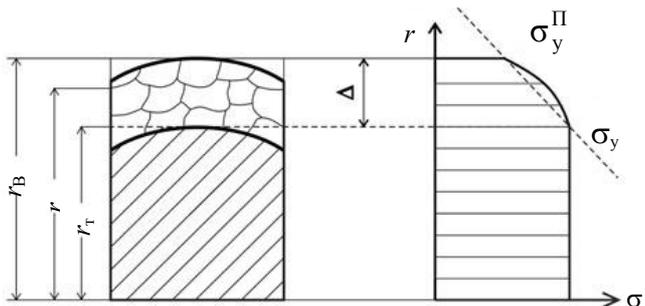


Рис. 1. График изменения напряжения течения по радиусу вала

**Глубина упрочнения и методика ее экспериментального определения.** Экспериментально глубина упрочнения может быть определена измерением твердости; деформаций; физических свойств (электрического сопротивления, электромагнитных свойств и др.); плотности различных дефектов кристаллического строения и изменений в микроструктуре; ширины линий рентгеновского спектра [6, 7].

Следует заметить, что результаты экспериментального определения глубины упрочнения различными методами различаются на десятки процентов, а иногда вообще не сравнимы [6]. В большей степени это связано с тем, что граница раздела упрочненного и основного материала сильно размыта. Контролируемый параметр вблизи этой границы изменяется с весьма малым градиентом. Совершенно ясно, что первые признаки искажений кристаллической решетки будут обнаружены физическими методами исследования (рентгеновский метод) на большей глубине, чем первые признаки увеличения микротвердости или искажений координатной сетки.

Поэтому толщина упрочненного слоя определяется всегда с некоторой погрешностью, величина которой зависит от метода измерений и присущих ему погрешностей. В связи с этим понятие глубины упрочнения является условным. Оно наполняется смыслом при решении определенных технологических задач, конечной целью которых является формирование определенных свойств поверхностного слоя.

При поверхностной пластической деформации нежестких валов глубина упрочнения должна быть в пределах величины зоны взаимного влияния. При этом важно обеспечить равномерность упрочнения (одинаковость глубины) по периметру в поперечном сечении и вдоль оси вала. Необходимо стремиться к тому, чтобы минимальная величина интенсивности деформаций на цилиндрической поверхности радиуса  $r_y$  была равномерной. Это условие должно быть обеспечено с учетом точности замера среднего размера зерна и точности экспериментального метода определения глубины деформационного упрочнения.

Область пластического деформирования может быть разделена на три зоны (рис. 2). Первая зона, непосредственно прилегающая к обработанной поверхности, являясь наиболее деформированной, характеризуется наиболее значительным повышением твердости, наибольшими искажениями кристаллической ре-

шетки разного структурного уровня. Эта зона располагается на глубине, составляющей 10...15 % от общей глубины наклепа. Вторая зона характеризуется менее отчетливо выявленным раздроблением зерен и другими искажениями кристаллической решетки. Глубина второй зоны составляет 50...70 % от общей глубины наклепа. В третьей зоне деформации затухают. Здесь располагаются такие деформированные слои, которые по своей твердости незначительно отличаются от твердости основы [8].

Для определения глубины упрочнения в данной работе был выбран электромагнитный способ, фиксирующий начало микропластического течения в поверхностном слое [4], данные которого контролировались широко распространенным способом замера микротвердости.

В таблице представлен размер каждой из выделенных зон (см. рис. 2), измеренных количеством зерен при упрочнении на глубину зоны взаимного влияния. Размер первой зоны (два зерна) совпадает с толщиной поверхностного слоя, в котором в основном происходит накопление дефектов разного уровня при циклическом нагружении. При этом третья зона при изменении размера зерна от 10 до 45 мкм начинается на глубине от 110 до 405 мкм. Следовательно, после определения величины контролирующего параметра (напряжения течения поверхностного слоя, микротвердость) на поверхности, следует перейти к определению таковых сразу в третьей зоне.

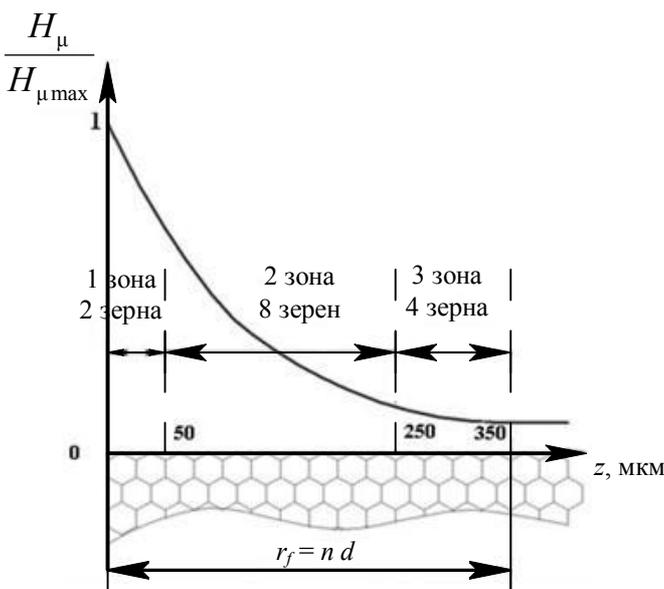


Рис. 2. Распределение относительной твердости по толщине поверхностного слоя

Размер зон наклепа в пределах поверхностного слоя

Размер зерна, мкм	10	15	25	35	45
Число зерен в зоне влияния	16	14,6	13,75	12,75	11,75
Средняя величина 1-й зоны (количество зерен, мкм)	2 (20)	2 (30)	2 (50)	2 (70)	2 (90)
Средняя величина 2-й зоны (количество зерен, мкм)	9 (90)	9 (134)	8 (200)	8 (280)	7 (315)
Средняя величина 3-й зоны (количество зерен, мкм)	4 (40)	4 (60)	4 (100)	4 (140)	3 (135)

Напряжение течения поверхностного слоя определяли по 10 – 15-ти точкам поверхностной микротвердости. За глубину упрочнения принималась граница, на которой напряжение течения поверхностного слоя и микротвердость отличались от последующих замеров по глубине на величину интервала разброса экспериментальных данных.

**Шероховатость поверхности.** Эффективность воздействий на приповерхностный объем детали поверхностным пластическим деформированием при минимальной величине остаточных напряжений ограничена условием достижения минимально возможной шероховатости. В то же время минимальная глубина упрочнения не может быть меньше размера зерна, а максимальная больше размеров зоны взаимного влияния. Чем меньше размер зерна, тем меньше размер зоны взаимного влияния и тем большее количество зерен в пределах этой зоны [8].

Очевидно, при заданной шероховатости и размере зерна микроструктуры для валов малой жесткости существует минимальная глубина упрочнения в пределах зоны взаимного влияния, обеспечивающая достаточно низкую шероховатость и высокую несущую способность.

Для проверки этой гипотезы были проведены экспериментальные исследования на образцах из стали 35 в нормализованном состоянии, имевших длину 300 мм и диаметр 16 мм

и шероховатость  $Ra = 1,25; 2,5$  и  $5,0$  мкм. Средний размер зерна ферритно-перлитной структуры в поверхностном слое во всех образцах составлял  $30$  мкм.

При всех исследованных значениях исходной шероховатости рациональная частота вращения оказалась в пределах от  $280$  до  $320$  об/мин (рис. 3), что соответствует величине силы прижима ролика около  $380...420$  Н.

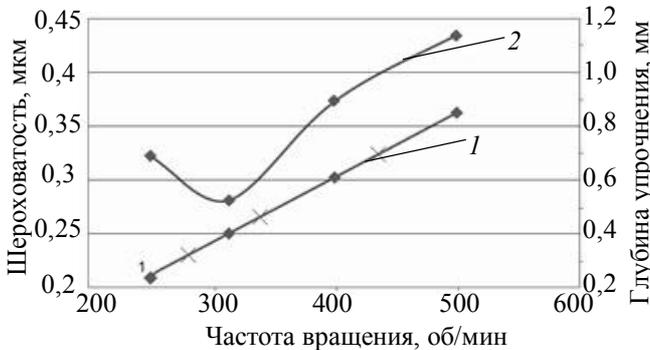


Рис. 3. Зависимость глубины упрочнения (1) и шероховатости поверхности вала (2) от частоты вращения центробежного обкатника. Продольная подача:  $0,11$  мм/об; сталь 35; масса груза  $2$  кг; размер зерна  $d = 30$  мкм

Глубина упрочнения поверхностного слоя монотонно возрастает при увеличении числа оборотов. Обнаружена взаимосвязь минимальной шероховатости с величиной зоны взаимного влияния. Для стали 35 при глубине упрочнения равной  $330...420$  мкм, как видно из графика (см. рис. 3, кривая 1), получаемая после центробежного обкатывания, шероховатость уменьшается почти в  $9$  раз по сравнению с начальной.

Как это видно на рис. 3, при размере зерна  $30$  мкм, указанная глубина упрочнения, близка к толщине ослабленного поверхностного слоя (размеру зоны взаимного влияния, равной  $370...390$  мкм для зерна размером  $30$  мкм). Дальнейшая деформация шероховатости поверхности с частотой более  $320$  об/мин приводит к распространению пластической деформации на глубину большую, чем размер зоны взаимного влияния. При этом приповерхностный слой зерен деформируется до критической деформации, после которой как показано в работе [8] он более не упрочняется.

При частоте вращения обкатника около  $460...550$  об/мин и подаче  $0,11$  мм/об в эксперименте наблюдалось шелушение поверхностного слоя. Это свидетельствует о критической деформации поверхностного слоя зерен и перенаклепе объема, залегающего на глубине более чем размер зоны взаимного влияния.

Параметр шероховатости  $Ra$  существенно не изменяется по сравнению с его минимальным значением при уменьшении глубины упрочнения почти в  $2$  раза (см. рис. 3). Это, как известно, существенно уменьшает остаточные напряжения, возникающие при ППД.

Таким образом, рациональные технологические параметры отделочной обработки нежестких деталей следует искать вблизи границы зоны взаимного влияния, которая находится на глубине  $\Delta$ , определяемой по формуле (4).

**Остаточные напряжения.** Наиболее важными показателями качественной обработки нежестких валов является равномерность обработки и связанная с ней равномерность распределения остаточных напряжений и их релаксационная стойкость.

Наибольшее значение в обеспечении стабильности геометрических параметров заготовки, обработанной ППД, имеют продольные остаточные напряжения [9], их величина и распределение по длине заготовки.

Закономерность формирования остаточных напряжений изучали по методике, изложенной в работе [4], на образцах, упрочненных при рациональной величине профильного радиуса ролика, подачи и разной частоте вращения обкатника.

Изменение осевых остаточных напряжений по толщине ПС представлено на рис. 4. Максимальная величина остаточных напряжений смещается с поверхности в глубину ПС на расстояние, не превышающее  $2$ -х размеров зерен ( $60$  мкм), если глубина упрочнения не выходит за пределы зоны взаимного влияния ( $n = 315$  об/мин). При частоте вращения значительно больше рациональной ( $500$  об/мин) максимум осевых остаточных напряжений смещается на глубину около  $100$  мкм с одновременным уменьшением интенсивности роста. Глубина залегания остаточных напряжений увеличивается с увеличением частоты вращения центробежного обкатника.

Существенно уменьшить величину осевых остаточных напряжений при обкатке нежестких валов за счет уменьшения рабочего усилия невозможно, так как возрастет шероховатость и уменьшится контактная жесткость.

**Твердость поверхностного слоя.** Степень упрочнения в технологии машиностроения принято оценивать по величине твердости или микротвердости.

Закономерности упрочнения по глубине ПС изучены по величине микротвердости (рис. 5). Максимум микротвердости при частоте вращения от  $200$  до  $400$  об./мин расположен не на

поверхности вала, а на глубине около двух размеров зерен. Чем больше частота вращения обкатника, тем больше микротвердость поверхности. После достижения максимума микротвердость интенсивно уменьшается. При рациональной частоте вращения большая

часть деформационного упрочнения сосредоточена в пределах около половины размера зоны взаимного влияния. Начиная с некоторой частоты вращения обкатника, поверхностный слой зерен не упрочняется.

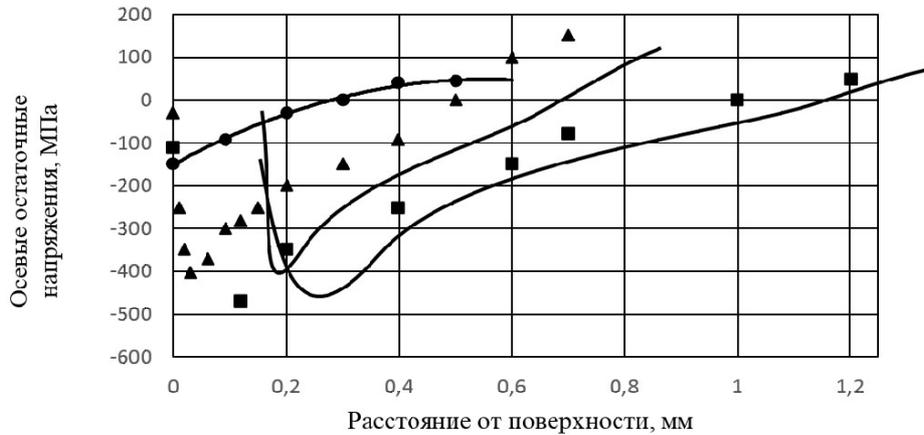


Рис. 4. Изменение осевых остаточных напряжений по глубине ПС при различной частоте вращения обкатника (сталь 35 с размером зерна 30 мкм; ролик с профильным радиусом 5 мм; подача 0,11 мм/об; масса груза 2 кг):  
● – 200 об/мин; ▲ – 315 об/мин; ■ – 500 об/мин

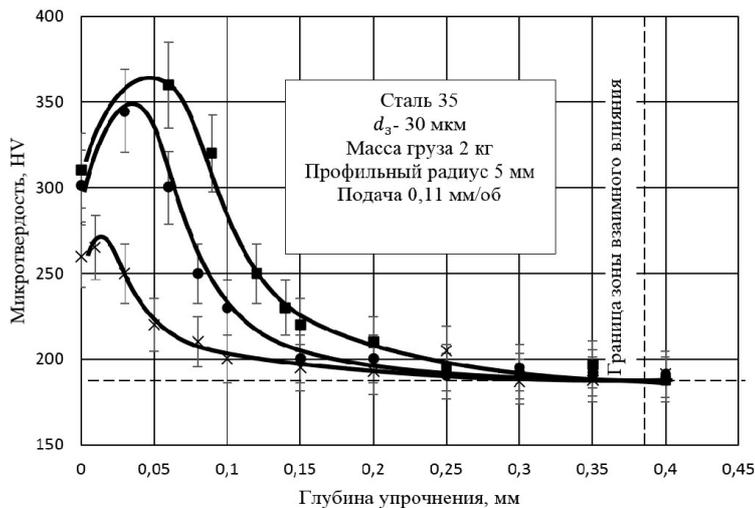


Рис. 5. Распределение микротвёрдости по глубине упрочненного слоя при частоте вращения обкатника :  
● – 315 об/мин; ■ – 400 об/мин; × – 200 об/мин

### Заключение

В результате выполненных исследований было установлено, что качество малоожестких валов зависит от равномерности распределения напряженного состояния и механических свойств в объеме тела. Для обеспечения этого условия предложено учитывать действительное состояние поверхностного слоя в области зоны взаимного влияния. Предложено обеспечивать равномерность механических свойств в

объеме деталей за счет упрочнения поверхностного слоя в пределах зоны взаимного влияния, величина которой зависит от размера зерна приповерхностного слоя.

Учитывая, что глубина упрочнения влияет на качество поверхностного слоя, проведено исследование остаточных напряжений, шероховатости и твердости поверхностного слоя, упрочненного на глубину зоны взаимного влияния.

Экспериментально-расчетным путем установлено, что при размере зерна около 30 мкм (сталь 35) размер зоны взаимного влияния составляет 370...390 мкм. Такая глубина упрочнения обеспечивается при частоте вращения деформирующего инструмента в пределах 280...320 об./мин. Таким образом, в результате выполненных исследований было установлено, что упрочнение на глубину зоны взаимного влияния позволяет получить высокое качество поверхностного слоя мало жестких валов.

### БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зайдес С.А., Скороходов К.А., Кургузов А.С. Устройство для упрочнения поверхности цилиндрических деталей: А.С. 1719191 МКИЗкл. 24 В 39/04 СССР – 4806904/27; заявлено 28.03.96; опубл. 15.03.92. Бюл. №10.
2. Драчев О. Технология изготовления мало жестких осесимметричных деталей. М.: Политехника 2005. 342 с.
3. 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.
4. Горбунов В.Ф. Напряженное и предельное состояния поверхностного слоя поликристаллических материалов // Иркутский сельскохозяйственный ин-т. 1987. 16 с. Деп. № 478-B88, ВИНТИ.
5. Балохонов Р., Болеста А., Бондарь М. Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах; под ред. В.Е. Панина. Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. 520 с.
6. Смелянский В.М. Механика упрочнения материалов поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 2002. 300 с.
7. Зайдес С.А., Нго К.К. Научное обоснование деформаций в стесненных условиях // Научные технологии в машиностроении. 2015. № 9(51). С. 39–43.

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

9. Зайдес С.А. Остаточные напряжения и качество калиброванного металла. Иркутск: Изд-во Иркут. ун-та, 1992. 200 с.

### REFERENCES

1. Zaides S.A., Skorokhodov K.A., Kurguzov A.S. Device for Cylindric Part Surface: A.C. 1719191 ICICl. 24 В 39/04 USSR – 4806904/27; claimed 28.03.96; published. 15.03.92. Bull. №10.
2. Drachyov O. *Technology for Low-rigid Axial-symmetric Part Manufacturing*. M.: Polytechnica 2005. pp. 342.
3. Gorbunov A.V., Gorbunov V.F. Resistance to Round Shaft Plastic Forming at Bend Taking into Account Surface Layer Special Properties // *Inter-College Proceedings*; under the editorship of S.A. Zaides. Irkutsk: Publishing House of IrSTU. 2010. pp. 25–38.
4. Gorbunov V.F. Stressed and Limiting State of Polycrystalline Materials // Irkutsk Agricultural Institute. 1987. pp. 16. Dep. № 478-B88, VINITI.
5. Balokhonov R., Bolesta A., Bondar M. *Surface Layers and Inner Boundaries in Heterogeneous Materials*; under the editorship of V.E. Panin. Novosibirsk: Publishing House of SB RAS, 2006. pp. 520.
6. Smelyansky V.M. *Mechanics of Material Strengthening by Surface Deformation*. M.: Mechanical Engineering, 2002. pp. 300.
7. Zaides S.A., Ngo K.K. Scientific substantiation of deformations in constrained conditions // *Science Intensive Technologies in Mechanical Engineering*. 2015. № 9(51). pp. 39–43.
8. Gorbunov A.V., Gorbunov V.F. Regularities in Steel 25 Surface Layer Strain Hardening // *Bulletin of IrSTU*. 2011. № 6. pp. 50–52.
9. Zaides S.A. *Residual Stress and Quality of Calibrated Metal*. Irkutsk: Publishing House of Irkutsk Uni., 1992. pp. 200.

Рецензент д.т.н. А.В. Киричек