

НОВЫЕ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЕ ПРОЦЕССЫ И ОБОРУДОВАНИЕ

УДК 621.787.4.011.015

<https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-129-139>

НОВЫЕ СПОСОБЫ ПОВЕРХНОСТНОГО ПЛАСТИЧЕСКОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПРИ ИЗГОТОВЛЕНИИ ДЕТАЛЕЙ МАШИН

Зайдес С.А.

Иркутский национальный исследовательский технический университет, Иркутск, Россия

Аннотация

Поверхностное пластическое деформирование (ППД) является эффективным методом отделочно-упрочняющей обработки изделий машиностроения. При упрочнении маложестких цилиндрических деталей типа валов и осей традиционные способы обработки ППД исчерпали свои возможности. Для получения высококачественных заготовок из калиброванной стали разработан способ охватывающего ППД, использующий в качестве рабочего инструмента кольцевой индентор–матрицу. Упрочнение прутков охватывающим ППД обеспечивает стабильность напряженного состояния по длине заготовки при высокой скорости деформирования. На основе теории малых упругопластических деформаций и метода конечных элементов построена математическая модель процесса охватывающего деформирования, позволяющая определять текущие и остаточные напряжения в любой точке нагруженного тела. Для обеспечения стабильности относительного обжатия, не зависящего от величины поля допуска на обрабатываемый размер, разработан обкатник центробежного типа, формирующий стабильное рабочее давление в очаге деформации. При данной схеме обработки заготовка совершаает осевое перемещение, а рабочий инструмент – вращательное. Небольшие по размерам маложесткие детали, а также короткие цилиндрические детали типа пальцев и роликов практически невозможно обработать традиционными методами упрочнения. Для обработки таких деталей предлагается использовать поперечную обкатку плоскими плитами, которая является не только высокопроизводительным технологическим процессом, но и позволяет получать высокое качество поверхности слоя. Для повышения стойкости деформирующего инструмента и формирования регулярного микрорельефа на упрочненной поверхности разработан технологический процесс отделочно-упрочняющей обработки осциллирующим выглаживанием. Интенсификацию напряженного состояния, которая необходима для снижения радиальной нагрузки при упрочнении деталей малой жесткости, можно обеспечить за счет использования деформирующего инструмента с новой кинематикой рабочего движения. Поверхностное пластическое деформирование в стесненных условиях закрепления заготовки и (или) в стесненных условиях нагружения является новым технологическим процессом, обеспечивающим повышение интенсивности напряжений в очаге упругопластической деформации.

Ключевые слова: поверхностное пластическое деформирование, осциллирующее выглаживание, центробежная обработка, охватывающее упрочнение, поперечная обкатка

Введение

Для повышения долговечности различных деталей машин в производстве широко применяют технологии поверхностного пластического деформирования (ППД). Отделочно-упрочняющие методы обработки ППД просты в реализации, экономичны, производительны, обеспечивают формирование низкой шероховатости, заданной глубины и степени упрочнения, остаточных напряжений сжатия в поверхностных слоях, мелкозернистой структуры и других показателей качества обработанных деталей [1–4].

Поверхностное пластическое деформирова-

ние традиционно осуществляется локальным рабочим инструментом (шарик, ролик, диск, алмазный индентор). Пластическое локальное воздействие позволяет выполнять отделочно-упрочняющую обработку разнообразных деталей сложных и простых форм. Однако при обработке цилиндрических деталей малой жесткости известные методы ППД исчерпали свои технологические возможности. В работе рассматриваются новые способы ППД, разработанные в Иркутском национальном исследовательском техническом университете.

Охватывающее поверхностное пластическое деформирование. Анализ на технологичность длинномерных маложестких изделий показал, что в некоторых случаях для изготовления

© Зайдес С.А., 2018

деталей машин целесообразно использовать способы обработки металлов давлением (ОМД), которые могут быть реализована на трех стадиях технологического процесса: заготовительной, формообразующей и отделочной. Используя металлургические процессы волочения и калибрования, можно получать заготовки максимально приближенные по форме и размерам к готовым деталям. В условиях машиностроительного производства заготовки могут быть доведены до формы готовых деталей при использовании, например, процесса редуцирования через жесткую матрицу [5,6]. Окончательно заданные размеры деталей, качество поверхности и напряженно-деформированное состояние поверхностного слоя можно получить ППД, позволяющее сформировать высокое качество поверхностного слоя [1–4].

Однако при упрочнении длинномерных и маложестких цилиндрических деталей возможности существующих локальных методов упрочнения в значительной мере исчерпаны: при ограниченной производительности они не обеспечивают необходимой точности диаметральных размеров и стабильности геометрической формы. Для упрочнения деталей указанного типа целесообразен отход от традиционных схем обработки. В качестве перспективного направления предложен способ охватывающего поверхностного пластического деформирования (ОППД), реализующий схему осесимметричного нагружения на ограниченном участке изделия [7]. Способ отличается высокой производительностью и позволяет изменять характеристики формируемого поверхностного слоя в широких пределах.

Пластическое деформирование при осесимметричном нагружении имеет в некоторых случаях явные преимущества по сравнению с локальными методами поверхностной пластической обработки:

- высокая производительность процесса за счет больших скоростей деформирования;
- обеспечение стабильности диаметрального размера по длине заготовки и значительное уменьшение погрешности исходного размера;
- получение заданного размера за один проход при припусках, превышающих на порядок и более припуски, устанавливаемые для поверхностного пластического деформирования;
- шероховатость упрочненных поверхностей соизмерима с шероховатостью, имеющей место при финишных операциях.

Кинематическая простота ОППД, когда обработка осуществляется лишь за счет осевого

перемещения заготовки или инструмента, привлекает внимание и производственников. Однако реализовать такой принцип обработки удается не всегда и не сразу – обрывы, трещины, расслоения, искривления и другие дефекты свидетельствуют о том, что кажущаяся простота процессов является мнимой.

Реализовать данную технологию можно двумя способами: охватывающее деформирование по схеме сжатия (**рис. 1, а**) и охватывающее деформирование по схеме растяжения заготовки (**рис. 1, б**).

В качестве деформирующего инструмента при этом используют кольцевой индентор – матрицу. Рабочие деформирующие инструменты (фильтры, волоки, матрицы) состоят из трех основных частей: рабочей, имеющей форму усеченного конуса, калибрующей (цилиндрической) части и выходной части в виде обратного конуса.

При практической реализации предлагаемых процессов пластического деформирования возникает ряд новых проблем. Одна из них относится к выявлению напряженно-деформированного состояния обработанных изделий. Практика ОМД показывает, что в некоторых случаях холоднодеформированные изделия получают трещины, которые приводят к разрушению материала (**рис. 2**).

Определение напряженно-деформированного состояния (НДС) в очаге деформации является ключевым вопросом для понимания сущности технологического процесса и выявления факторов, оказывающих влияние на качество и эксплуатационные характеристики деталей машин и изделия в целом. Напряженное состояние упругопластического материала в очаге деформации является основной информацией для определения по результатам разгрузки остаточных напряжений.

На основе теории малых упругопластических деформаций и метода конечных элементов [8, 9] построена математическая модель процесса охватывающего упрочнения, позволяющая определять текущее и остаточное напряженно-деформированное состояния в произвольной точке нагруженного осесимметричного тела [7]. Достоверность предложенной модели упрочнения подтверждена известным аналитическим решением (задача Ламе) и экспериментальными результатами по деформированному и остаточному напряженному состояниям [10].

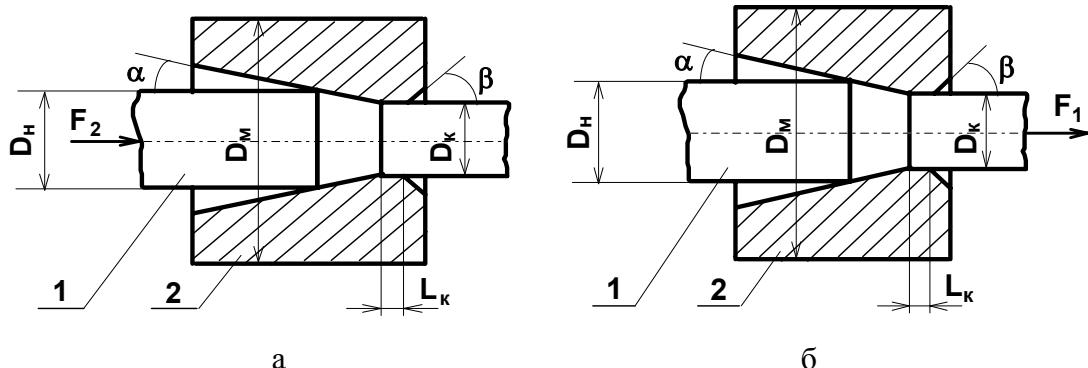


Рис. 1. Технологические схемы охватывающего деформирования по схеме сжатия (а) и растяжения (б) заготовки (1 – заготовка; 2 – матрица)

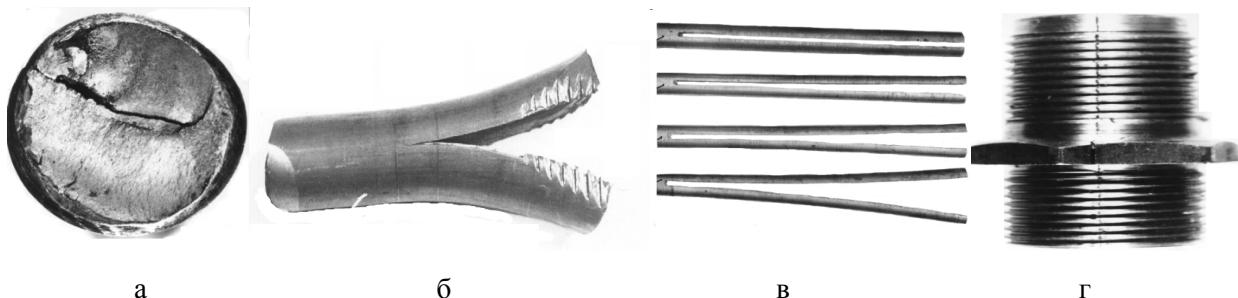


Рис. 2. Дефекты изделий из калиброванного металла:
а – раскрытие конца прутка при выходе из матрицы; б – трещина на конце заготовки после холодного деформирования; в – искажение формы заготовки при фрезеровании продольного паза;
г – трещина на поверхности детали после обработке резанием

На уровне изобретений разработаны технологическое оборудование и оснастка для охватывающего упрочнения. Конструктивные и технологические решения защищены патентами РФ [7]. Так, для упрочнения преимущественно длинномерных изделий спроектирован и изготовлен универсальный станок для реализации ОППД по схеме растяжения и сжатия заготовки. В условиях серийного производства относительно короткие детали типа осей и втулок можно упрочнить на станке, работающем в полуавтоматическом режиме. Для упрочнения отдельных концевых участков деталей типа валов спроектирован станок, обеспечивающий соосность обработанных поверхностей. Для реализации охватывающего деформирования на универсальном прессовом оборудовании разработана технологическая оснастка, работающая в автоматическом режиме [7].

Поверхностное пластическое деформирование с использованием центробежного обкатника. В некоторых случаях ОППД имеет ограничения по применению. Это касается остаточного напряженного состояния в упрочненных изделиях. Экспериментальными исследованиями

[11] и расчетными данными [7] установлено, что остаточные напряжения при охватывающем деформировании весьма чувствительны к степени относительного обжатия. Это приводит к тому, что даже величина поля допуска на заготовку влияет на величину относительного обжатия, а следовательно, на величину и характер распределения остаточных напряжений [7]. Таким образом, выполняя охватывающее деформирование через жесткую матрицу, можно получить заготовки с разным уровнем остаточных напряжений, что не обеспечивает стабильности заготовок по напряженному состоянию.

Аналогичные проблемы имеют место и при использовании известных локальных методов поверхностного деформирования. Формирующиеся при ППД остаточные напряжения характеризуются величиной, знаком и глубиной залегания. Все эти величины зависят от многих факторов, среди которых основными являются условия проведения поверхностной пластической обработки и механические свойства обрабатываемого материала [12,13].

Многие исследователи [14–16] отмечают чрезвычайную важность равномерности обра-

ботки, обеспечивающей однородность деформации, уравновешенность остаточных напряжений их равномерную релаксацию при эксплуатационной нагрузке. В отличие от жестких валов выполнение этого условия зависит не только от конструкции инструмента и режимов упрочнения, но и от механических свойств поверхностного слоя, закономерностей его микропластической деформации при технологическом воздействии, релаксационной стойкости при эксплуатации.

Выбор конструкции рабочего инструмента определяется основными качественными показателями обработки поверхностного слоя. Однородность упрочнения, отсутствие изогнутости вала, малая величина остаточных напряжений, их уравновешенность и равномерная релаксация во время эксплуатации и другие показатели связаны с величиной усилия прижима инструмента. Инструмент должен обеспечивать постоянство этого усилия при любых изменениях формы детали, наличии пространственной погрешности и колебаний в технологической системе.

Чтобы избавиться от большей части проблем, обусловленных динамикой взаимодействия частей технологической системы, необходимо остановить вращение детали, вывести ее из непосредственного взаимодействия с патроном, задней бабкой и люнетами. При такой схеме обработки невозможно образование начальных напряжений от закрепления в патроне и задней бабки, так как есть возможность продольной деформации любой величины. В этом случае для обеспечения обработки ППД всей поверхности нежесткого вала необходимо вращать инструмент. Для исключения деформации изгиба заготовки усилием прижима деформирующего элемента необходим инструмент с полным силовым замыканием.

Для создания рабочего усилия прижима деформирующего тела (шарика, ролика и др.) в настоящее время используется достаточно широкий спектр различных конструкций. Центробежный инструмент более предпочтителен для обеспечения высокой производительности при заданном качестве и стабильности процесса обработки. К недостаткам известных конструкций центробежных раскатников следует отнести большую частоту вращения инструмента. Для генерации рабочего усилия необходимой величины, обеспечиваемого силой инерции при малой массе роликов, требуется большая частота вращения инструмента, которую не обеспечивает стандартное оборудование. Высокая частота вращения приводит также к возникновению вибраций, что, несомненно, сказывается на однородности обработки. Наиболее простым решением проблемы увеличения рабочего усилия, генерируемого центробежной силой, является применение рычажной системы. Такая компоновка центробежного обкатника была разработана и запатентована ИРНИТУ [17]. На криволинейном рычаге закрепляется деформирующий элемент и груз (рис. 3).

Вся система вращается относительно неподвижной оси заготовки, и сила инерции груза создает момент относительно точки закрепления рычага, который уравновешивается моментом рабочего усилия относительно той же точки. При малой длине плеча криволинейного рычага относительно точки закрепления рычага возрастает величина рабочего усилия. Таким образом, деформирующее усилие регулируется соотношением плеч и величиной груза. При большой величине груза достаточные для обработки ППД усилия возникают при частоте вращения, обеспечиваемой стандартным оборудованием. Использование центробежного обкатника позволяет регулировать величину жесткости на изгиб обрабатываемой детали установкой двух дополнительных опор как в конструкции обкатника, так и вне его на станине станка. Качество упрочненного слоя при использовании центробежного обкатника изложено в работах [18, 19].

ППД поперечной обкаткой плоскими плитами. Известные способы ППД не позволяют обрабатывать небольшие по габаритам детали малой жесткости в виде осей, валиков, пальцев, так как они легко изгибаются при нагружении деформирующим инструментом. Имеется и ряд других деталей машин, в которых отсутствуют центральные отверстия, что не позволяет закреплять их в центрах металлорежущих станков. Для отделочно-упрочняющей обработки указанного класса деталей предложена схема обкатки плоскими плитами.

Процесс поперечной обкатки плоскими плитами аналогичен процессу поперечно-клиновой прокатки, процессу накатки профиля на крепежных изделиях [20–22]. Основными параметрами поперечно-клиновой прокатки являются степень обжатия и геометрия инструмента. В процессе поперечной обкатки инструмент имеет вид плоской плиты с малым углом заходной части α_1 (рис. 4). Малый угол α_2 в выходной части инструмента служит для уменьшения концентрации напряжения при выходе детали из зоны обработки. Поэтому для процесса поперечной обкатки основным параметром режима обработки является степень относительного обжатия Q [20].

$$Q = \frac{F_i - F_{\text{пр}}}{F_{\text{пр}}} = \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right) \cdot 100\%, \quad (1)$$

где F_i – площадь исходного сечения заготовки; $F_{\text{пр}}$ – площадь поперечного сечения заготовки после обкатки; D – исходный диаметр заготовки; d – диаметр заготовки после обкатки.

Кинематика процесса поперечной обкатки плоскими плитами и режимы обработки изложены в работах [23–25].

Отличительной особенностью упрочняющей обработки на плоских плитах являются: высокая

производительность процесса, возможность автоматизации технологического процесса, отсутствие необходимости закрепления детали перед обработкой, отсутствие центральных отверстий, доступность полной обработки цилиндрической поверхности без переустановки детали, отсутствие изгиба при упрочнении, возможность обработки тонких (маложестких) деталей. Для реализации процесса упрочнения поперечной обкаткой плоскими плитами в условиях многосерийного производства разработана новая конструкция обкатного станка [26].

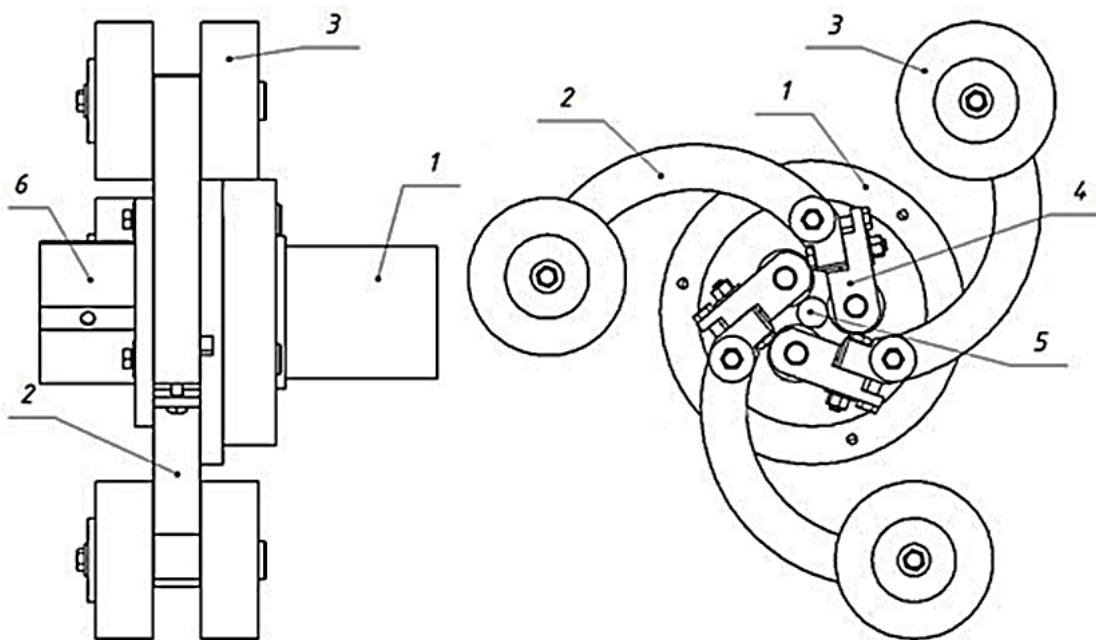


Рис. 3. Центробежный обкатник: 1 – корпус; 2 – рычаг; 3 – груз; 4 – державка с деформирующим роликом; 5 – обкатываемая деталь; 6 – дополнительная опора (защитный кожух убран)

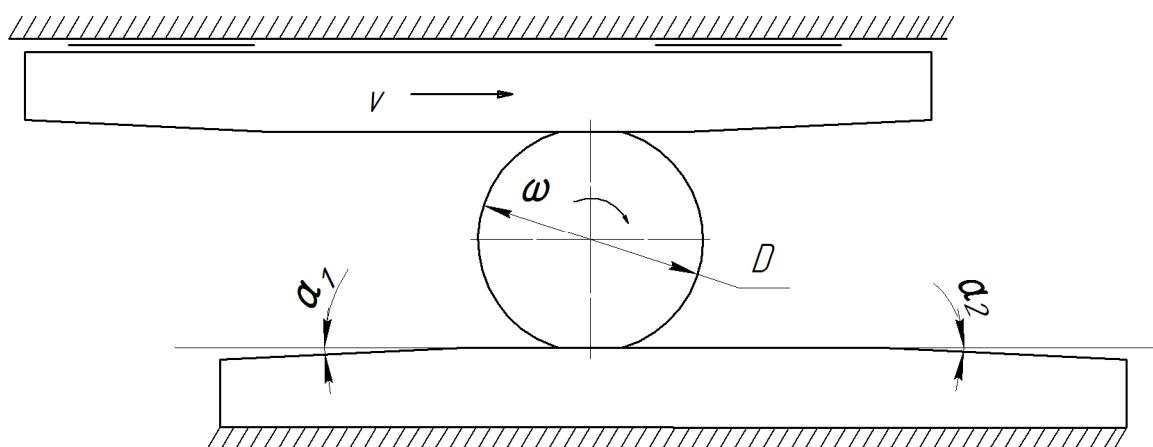


Рис. 4. Схема процесса поперечной обкатки плоскими плитами

Отделочно-упрочняющая обработка осциллирующим выглаживанием. Эффективным направлением совершенствования методов ППД является применение дополнительных колебательных и осциллирующих движений [29], которые позволяют кроме отделочно-упрочняющей обработки формировать регулярный микрорельеф на упрочняющей поверхности. При совершенствовании методов отделочной обработки поверхностей и создании регулярного микрорельефа профессором Ю.Г. Шнейдером предложена схема вибрационного обкатывания [30], а профессором М.Е. Поповым разработана технология и инструментальное оснащение осциллирующего ППД [29]. Предложенные методы упрочняющей обработки отличаются кинематикой деформирующего инструмента, который совершает возвратно-поступательное движение вдоль или поперек оси детали. При этом каждая микрозона поверхностного слоя испытывает давление в разных направлениях. Перемена знака напряжений отражена эффектом Баушингера [31] и проявляется в изменении механических свойств упрочняемого материала.

В отличие от методов обработки, разработанных Ю.Г. Шнейдером и М.Е. Поповым, в предлагаемом методе рабочий инструмент совершает возвратно-поступательное движение в направлении, перпендикулярном оси детали, в то время как известные схемы обработки реализуют колебательное движение инструмента.

Схема осциллирующего выглаживания цилиндрических деталей представлена на рис 5. В качестве рабочего инструмента использована пластина, имеющая скругление на одном из торцов по радиусу r . Эта часть пластины является рабочим элементом, который прижимается к вращающейся обрабатываемой заготовке. Пластина может поворачиваться относительно вертикальной плоскости на некоторый угол α (см. рис. 5), а также совершать осциллирующее вертикальное движение относительно оси заготовки и перемещаться по направлению подачи S .

В результате сложного взаимодействия заданных параметров на обрабатываемой поверхности формируется микрорельеф, состоящий из синусоидальных канавок различной композиции и плотности. Образование на обработанной поверхности системы канавок, пересекающихся между собой с определенной закономерностью, улучшает процесс смазки трущихся пар. Установлено, что такие системы образуют искусственные «масляные карманы», в которых удерживается смазка, препятствующая «схватыва-

нию» контактирующих поверхностей трущихся пар; формируют на поверхностях деталей регулярные неровности различной формы расположения в зависимости от требуемых эксплуатационных характеристик и свойств; создают на со прягаемых цилиндрических поверхностях винтовые микрошлизы; обеспечивают декоративную обработку поверхностей деталей взамен трудоёмкой абразивной обработки [32–34].

Влияние параметров осциллирующего выглаживания (продольная подача, натяг, частота вращения заготовки и угол наклона рабочего инструмента) на качество упрочненных деталей изложено в работах [27,35].

Интенсификация напряжений при ППД. При поверхностном пластическом деформировании деталей малой жесткости (тонкостенные, длинномерные детали) возможности локальных методов упрочнения ограничены. Это связано с малой изгибной жесткостью заготовки, вибрациями в механической системе, сложностью достижения заданного качества деталей, точности и производительности обработки, а также с отсутствием необходимого технологического оборудования. Пластическое деформирование поверхностного слоя вызывает значительные деформации и перемещения частиц металла, что отрицательно сказывается на геометрической форме изделий [13].

С учетом вышеизложенного возник вопрос о необходимости интенсификации напряженно-деформированного состояния в очаге деформации технологических способов поверхностного пластического деформирования для достижения высоких качественных показателей при обработке маложестких деталей.

С этой целью были разработаны новые технологические схемы ППД, обеспечивающие интенсификацию напряженного состояния в очаге упругопластической деформации. В практике ППД известны и широко используют две схемы упрочняющей обработки: упрочнение по схеме качения рабочего инструмента (рис. 6, а) и упрочнение по схеме скольжения (рис. 6, б). Последнюю схему значительно реже используют на практике, т.к. трение скольжения в зоне контакта приводит к большим тепловым процессам, а сам инструмент интенсивно изнашивается. Однако если оценить эти две схемы упрочнения с точки зрения механики процесса и возможности деформационного искажения микроструктуры, то обработка по схеме скольжения должна быть более эффективной.

Техническая идея по интенсификации напряженного состояния в очаге деформации заключа-

ется в изменении кинематики рабочего инструмента, которая усиливает искажение зернистой структуры материала. Предлагается вращать деформирующий ролик не относительно горизонтальной оси, а относительно вертикальной (рис. 6, в). В этом случае пластический отпечаток от ролика на поверхности детали представляет собой фигуру в виде эллипса, имеющего большую и малую оси. При вращении ролика вокруг вертикальной оси у—у происходит наложение пластических полей разных ориентаций по направлению, что должно способствовать «перемешиванию» структуры в поверхностном слое.

Если совместить два ролика вместе и вращать их также относительно оси у—у (рис. 6, г), то эффективность обработки будет значительно выше, так как в процессе деформирования участвует не два, а четыре очага деформации на каждый оборот ролика.

На рис. 7 показано влияние схем деформиро-

вания на максимальное эквивалентное остаточное напряжение и компоненты максимального остаточного напряжения образца. При ППД качением (простое обкатывание) происходит минимальное искажение структуры. При условии ППД скольжением возникает большое трение, которое приводит к повышению интенсивности напряжения в зоне деформации. При ППД с вращением ролика относительно своей диаметральной оси (у—у) за счет разных размеров очагов деформации напряжения усиливаются. Эффективный результат получен при ППД с вращением двух роликов относительно оси (у—у). В результате описанной конструкции профиля рабочей части двухрадиусного обкатного ролика металла поверхностного слоя детали при обработке находится в условиях сложного напряженного состояния, испытывает пластическую деформацию с накоплением большого числа искажений.

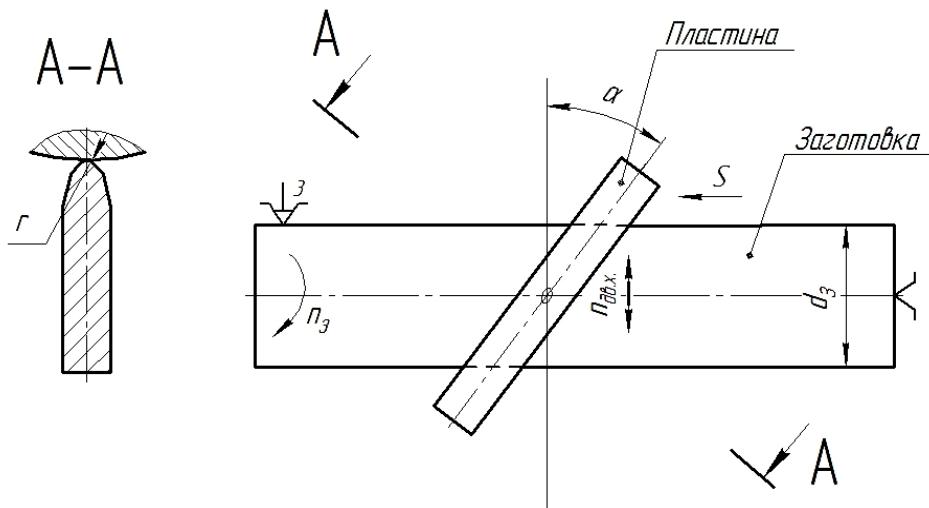


Рис. 5. Схема процесса осциллирующего выглаживания цилиндрических деталей

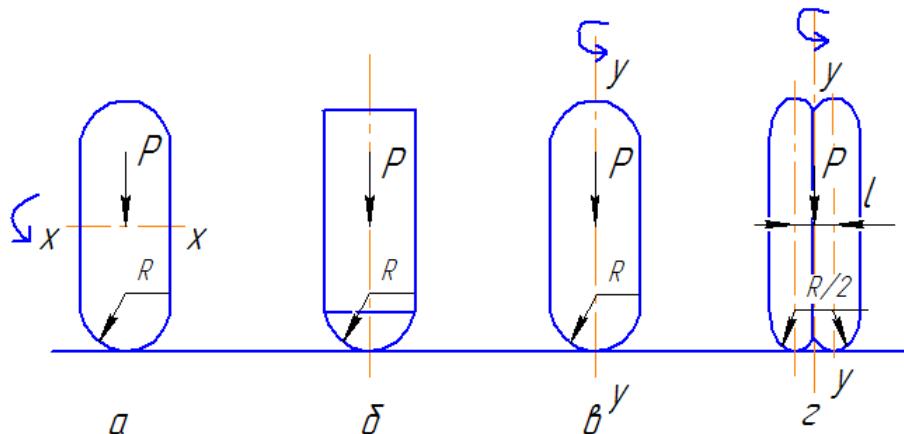


Рис. 6. Схемы нагружения при различных условиях контакта с обрабатываемой поверхностью
(x—x, y—y: оси вращения)

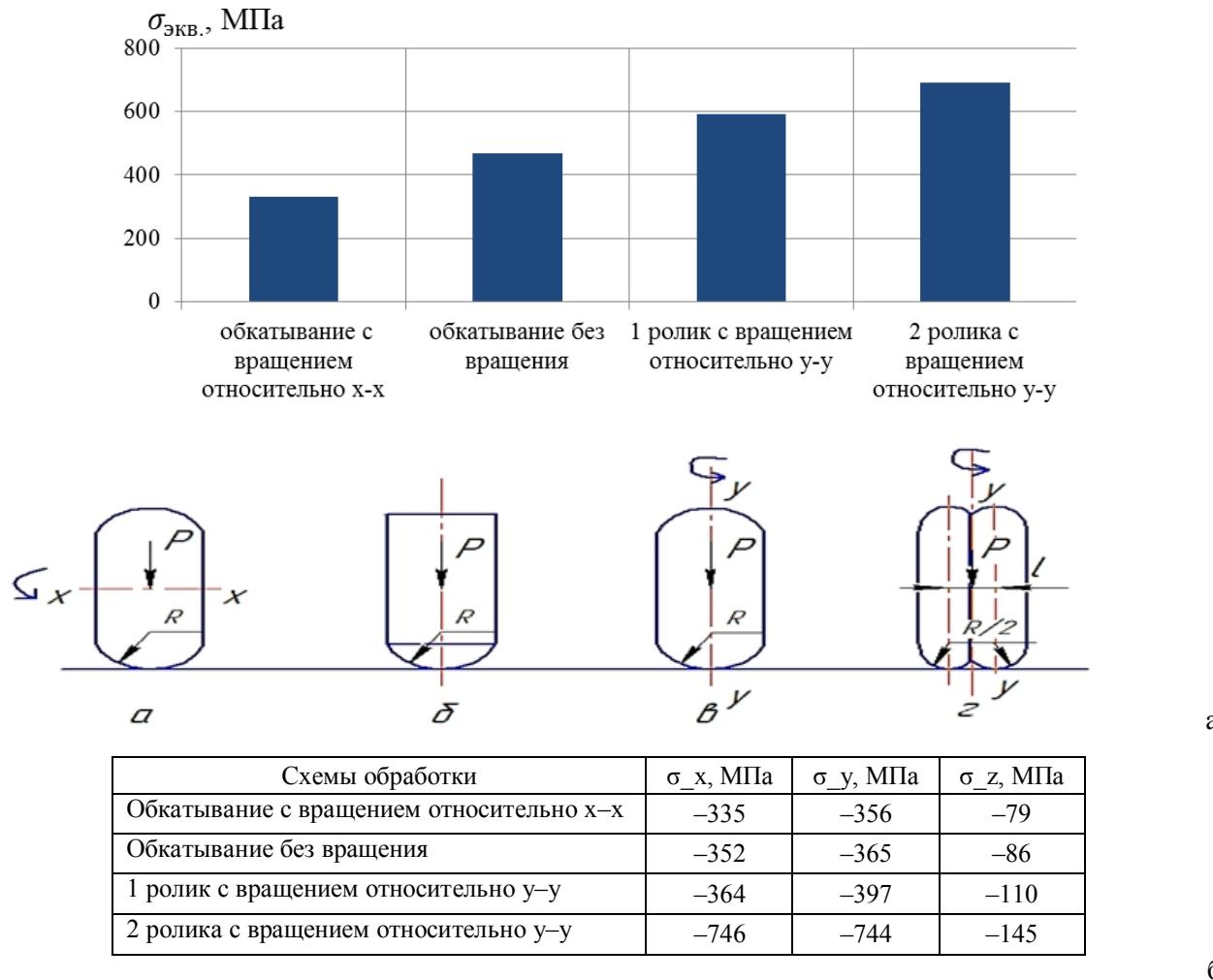


Рис. 7. Влияние схем деформирования на максимальные значения эквивалентных остаточных напряжений (а) и компонент максимальных остаточных напряжений образца (б)

Условие контакта и характер взаимодействия деформирующего инструмента с деталью в процессе обработки оказывает большое влияние на перераспределение материала поверхностного слоя. Выявлено, что основными факторами, оказывающими влияние на напряженно-деформированное состояние деталей, являются геометрия, форма, взаимное расположение элементов деформирующего инструмента и их кинематика относительно обрабатываемой детали.

Заключение

Для отделочно-упрочняющей обработки цилиндрических деталей малой жесткости разработаны новые технологические процессы поверхностного пластического деформирования.

В основе упрочняющих процессов использованы традиционные схемы обработки металлов давлением – калибровка и поперечная прокатка. Новые процессы локального упрочнения деталей

машин построены на изменении кинематики обработки – центробежное упрочнение и упрочнение роликом с изменённой кинематикой вращения. Расчетные данные и экспериментальные исследования показали достаточно высокую эффективность новых способов отделочно-упрочняющей обработки.

Список литературы

- Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1987. 328 с.
- Зайдес С.А., Забродин В.А., Мураткин В.Г. Поверхностное пластическое деформирование. Иркутск: Изд-во ИГТУ, 2002. 304 с.
- Суслов А.Г. Качество поверхностного слоя деталей машин. Москва: Машиностроение, 2000. 320 с.
- Блюменштейн В.Ю., Смелянский В.М. Механика технологического наследования на стадиях обработки и эксплуатации деталей машин. Москва: Машиностроение, 2007. 399 с.

5. Зайдес С.А. Прогрессивные методы обработки металлов давлением в технологии машиностроения // Вестник ИрГТУ. 1997. № 1. С. 80–85.
6. Зайдес С.А. Изготовление деталей машин холодным пластическим деформированием // Автоматизация и современные технологии. 1998. № 1. С. 9–11.
7. Зайдес С.А. Охватывающее поверхностное пластическое деформирование. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2001. 311 с.
8. Сегерлинд Л. Применение метода конечных элементов. М.: Мир, 1979. 392 с.
9. Галлагер Р. Метод конечных элементов. М.: Мир, 1984. 430 с.
10. Зайдес С.А. Оценка сходимости метода переменных параметров упругости при решении осесимметричных задач // Перспективные материалы, технологии, конструкции: сб. науч. тр. Красноярск, 1998. Вып. 4. С. 149–154.
11. Зайдес С.А. Остаточные напряжения и качество калиброванного металла. Иркутск: Изд-во Иркутск. гос. ун-та, 1992. 200 с.
12. Пшибыльский В. Технология поверхностной пластической обработки: пер. с польск. М.: Металлургия, 1991. 479 с.
13. Дальский А.М., Базаров Б.М., Васильев А.С. Технологическая наследственность в машиностроительном производстве. М.: Изд-во МАИ, 2003. 364 с.
14. Отений Я.Н. Технологическое обеспечение качества деталей машин поверхностным пластическим деформированием: монография. Волгоград: Политехник, 2005. 224 с.
15. Зайдес С.А., Забродин В.А., Мураткин Г.В. Поверхностное пластическое деформирование. Иркутск: Изд-во Иркутск. гос. техн. ун-та, 2002. 304 с.
16. Дрозд М.С., Матлин М.М., Сидякин Ю.И. Инженерные расчеты упругопластической контактной деформации. М.: Машиностроение, 1986. 224 с.
17. Зайдес С.А., Скороходов К.А., Кургузов А.С. Устройство для упрочнения поверхности цилиндрических деталей: а.с. 1719191 СССР, МКИ 3 кл. 24 В 39/04. 4806904/27; заявл. 28.03.96; опубл. 15.03.92. Бюл. №10.
18. Зайдес С.А., Горбунов А.В. Определение механических свойств поверхностного слоя маложестких валов, упрочненных поверхностным пластическим деформированием // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. №3, (123). С. 15–19.
19. Зайдес С.А., Горбунов А.В. Повышение эффективности упрочнения маложестких валов центробежным обкатыванием // Упрочняющие технологии и покрытия. 2015. №4 (124). С. 6–13.
20. Поперечно-клиновая прокатка / Андреев Г.В., Клушкин В.А., Макушок Е.М., Сегал В.М., Щукин В.Я. Минск: Наука и техника, 1974. 160 с.
21. Щукин В.Я. Основы поперечно-клиновой прокатки/ под ред. А.В. Степаненко. Мн.: Наука и техника, 1986. 223 с.
22. Фам Дац Фьюнг, Зайдес С.А., Нгуен Ван Хунь. Определение условий поперечной обкатки при поверхностном пластическом деформировании // Вестник ИрГТУ. 2015. №4. С. 48–52.
23. Зайдес С.А., Фам Дац Фьюнг. Аналитический расчет остаточных напряжений при упрочнении цилиндрических деталей поперечной обкаткой // Вестник ИрГТУ. 2015. № 12. С. 40–46.
24. Зайдес С.А., Фам Дац Фьюнг. Оценка напряженно-деформированного состояния цилиндрических деталей после поперечной обкатки плоскими плитами // Научные технологии в машиностроении. 2017. №5 (71). С. 38–43.
25. Зайдес С.А., Фам Дац Фьюнг. Оценка качества цилиндрических деталей после поперечной обкаткой плоскими плитами // Упрочняющие технологии и покрытия. 2016. №7 (139). С. 14–18.
26. Зайдес С.А., Фам Дац Фьюнг. Устройство для обкатывания цилиндрических изделий плоскими инструментами: пат. 2600302 РФ. Опубл. 20.10.2016. Бюл. № 29.
27. Зайдес С.А., Нгуен Ван Хунь. Оценка качества поверхностного слоя при реверсивном поверхностном пластическом деформировании // Вестник ИрГТУ. 2016. № 6. С. 34–40.
28. Зайдес С.А., Нгуен Ван Хунь. Влияние параметров осциллирующего выглаживания на шероховатость упрочненных поверхностей // Вестник ИрГТУ. 2017. Т. 21. №4. С. 22–29.
29. Обработка деталей поверхностным пластическим деформированием: монография / под ред. С.А. Зайдеса. Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2014. 559 с.
30. Шнейдер Ю.Г. Технология финишной обработки давлением: справочник. СПб: Политехника, 1988. 414 с.
31. Фридман Я.Б. Механические свойства материалов: в 2 ч. М.: Машиностроение, 1974. Ч. 1: Деформация и разрушение. 472 с.
32. Рыжов Э.В., Суслов А.Г., Федоров В.П. Технологическое обеспечение эксплуатационных свойств деталей машин. М.: Машиностроение, 1979. 176 с.
33. Смелянский В.М. Механика упрочнения деталей поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение. 2002. 299 с.
34. Жасимов М. М. Управление качеством деталей при поверхностном пластическом деформировании. Алматы: Наука, 1986. 205 с.
35. Зайдес С.А., Нгуен Ван Хунь. Влияние параметров осциллирующего выглаживания на шероховатость упрочненных поверхностей // Вестник ИрГТУ. 2017. № 4. С. 22–29.

Поступила 02.03.18
Принята в печать 07.05.18

NEW SURFACE PLASTIC DEFORMATION TECHNIQUES IN THE MANUFACTURE OF MACHINE PARTS

Semen A. Zaydes – DSc (Eng.), Professor, Head of Department of Mechanical Engineering Technologies and Materials Irkutsk National Research Technical University. E-mail: zsa@istu.edu

Abstract

Surface plastic deformation (SPD) serves as an efficient finishing and hardening technique in machine part manufacturing. When hardening low-rigidity cylindrical parts, such as shafts and axes, the conventional SPD techniques cannot offer any new opportunities. To obtain high-quality billets from calibrated steel, a new envelope SPD technique was developed that uses an annular die indenter as a working tool. Using the new technique for bar hardening ensures a consistent stress state along the length of the workpiece at a high strain rate. On the basis of the theory of small elastoplastic strains and the finite element method, a mathematical model of the envelope SPD process was built. Such model can help determine current and residual stresses in any point of the stressed body. To ensure a stable percentage reduction of area that would not depend on the tolerance zone of the machining size, a centrifugal roller was developed which creates a stable working pressure in the deformation zone. In this arrangement the workpiece moves axially while the working tool rotates. In practice it is nearly impossible to use conventional hardening techniques for small low-rigidity parts or short cylindrical parts such as pins and rollers. Transverse flat plate burnishing is proposed for such parts, which does not only offer high productivity, but also greatly improves the surface layer. An oscillatory burnishing process was developed to improve the tool durability and to obtain a regular microtopography of the hardened surface. Intensified stress state, which is necessary to reduce the radial loads when working low-rigidity parts, can be achieved due to a new kinematics of the burnishing tool. Surface plastic deformation under constrained fixing and/or loading conditions offers a new process that ensures more intense stresses in the elastoplastic deformation zone.

Keywords: Surface plastic deformation, oscillatory burnishing, centrifugal finishing, envelope hardening, transverse burnishing.

References

- Odintsov L.G. *Uprochnenie i otdelka detaley poverhnostnym plasticheskim deformirovaniem* [Hardening and finishing of machine parts through surface plastic deformation]. Moscow: Mashinostroenie, 1987, 328 p. (In Russ.)
- Zaides S.A., Zabrodin V.A., Muratkin V.G. *Poverkhnostnoe plasticheskoe deformirovanie* [Surface plastic deformation]. Irkutsk: Publishing House of Irkutsk State Technical University, 2002, 304 p. (In Russ.)
- Suslov A.G. *Kachestvo poverkhnostnogo sloya detaley mashin* [Surface layer quality in machine components]. Moscow: Mashinostroenie, 2000, 320 p. (In Russ.)
- Blyumenshtein V.Yu., Smelyansky V.M. *Mekhanika tekhnologicheskogo nasledovaniya na stadiyakh obrabotki i ekspluatatsii detaley mashin* [The mechanics of technological heredity in machine part finishing and operation]. Moscow: Mashinostroenie, 2007, 399 p. (In Russ.)
- Zaides S.A. Advanced metal forming techniques in machine building. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 1997, no. 1, pp. 80–85. (In Russ.)
- Zaides S.A. Manufacture of machine parts through cold plastic deformation. *Avtomatizatsiya i sovremennye tekhnologii* [Automation and advanced technology], 1998, no. 1, pp. 9–11. (In Russ.)
- Zaides S.A. *Okhvatyvayushchee poverkhnostnoe plasticheskoe deformirovanie* [Envelope burnishing]. Irkutsk: Publishing House of Irkutsk State Technical University, 2001, 311 p. (In Russ.)
- Segerlind L. *Primenenie metoda konechnykh elementov* [Applied finite element analysis]. Moscow: Mir, 1979, 392 p. (In Russ.)
- Gallagher R. *Metod konechnykh elementov* [Finite element analysis]. Moscow: Mir, 1984, 430 p. (In Russ.)
- Zaides S.A. Convergence analysis for the variable elasticity parameters method when solving axially symmetric problems. *Perspektivnye materialy, tekhnologii, konstruktsii: sb. nauch. tr.* [Innovative materials, technologies, structures: Research papers]. Krasnoyarsk, 1998, iss. 4, pp. 149–154. (In Russ.)
- Zaides S.A. *Ostatochnye napryazheniya i kachestvo kalibrivannogo metalla* [Residual stresses and the quality of calibrated steel]. Irkutsk: Publishing House of Irkutsk State University, 1992, 200 p. (In Russ.)
- Przybylski V. *Tekhnologiya poverkhnostnoy plasticheskoy obrabotki: per. s polsk.* [The process of surface plastic working: Translated from Polish]. Moscow: Metallurgiya, 1991, 479 p. (In Russ.)
- Dalsky A.M., Bazarov B.M., Vasilev A.S. *Tekhnologicheskaya nasledstvennost v mashinostroitelnom proizvodstve* [Technological heredity in machine building]. Moscow: Publishing House of Moscow Aviation Institute, 2003, 364 p. (In Russ.)
- Oteniy A.N. *Tekhnologicheskoe obespechenie kachestva detaley mashin poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem: monografiya* [Securing the quality of machine components through the application of surface plastic deformation: monograph]. Volgograd: Politekhnika, 2005, 224 p. (In Russ.)
- Zaides S.A., Zabrodin V.A., Muratkin G.V. *Poverkhnostnoe plasticheskoe deformirovanie* [Surface plastic deformation]. Irkutsk: Publishing House of Irkutsk State Technical Uni-

- versity, 2002, 304 p. (In Russ.)
16. Drozd M.S., Matlin M.M., Sidyakin Yu.I. *Inzhenernye raschety uprugoplasticheskoy kontaktnoy deformatsii* [Engineering analysis of elastoplastic contact deformation]. Moscow: Mashinostroenie, 1986, 224 p. (In Russ.)
 17. Zaides S.A., Skorokhodov K.A., Kurguzov A.S. *Ustroystvo dlya uprochneniya poverhnosti tsilindricheskikh detalej* [Machine for surface hardening of cylindrical parts]. Certificate of Authorship No. 1719191. Applied: 28.03.96. Published: 15.03.92. Bulletin No. 10.
 18. Zaides S.A., Gorbunov A.V. Analysing the mechanical properties of the surface layer in low-rigidity shafts hardened by burnishing. *Uprochnyyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [Hardening technology and coatings], 2015, no. 3, (123), pp. 15–19. (In Russ.)
 19. Zaides S.A., Gorbunov A.V. Hardening of low-rigidity shafts optimized through centrifugal burnishing. *Uprochnyyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [Hardening technology and coatings], 2015, no. 4 (124), pp. 6–13. (In Russ.)
 20. Andreev G.V., Klushkin V.A., Makushok E.M., Segal V.M., Shchukin V.Ya. *Poperechno-klinovaya prokatka* [Cross-wedge rolling]. Minsk: Nauka i tekhnika, 1974, 160 p. (In Russ.)
 21. Shchukin V.Ya. *Osnovy poperechno-klinovoy prokatki* [Fundamentals of cross-wedge rolling]. Ed. by A.V. Stepanenko. Minsk: Nauka i tekhnika, 1986, 223 p. (In Russ.)
 22. Pham Dac Phuong, Zaides S.A., Nguyen Van Huan. Determination of transverse burnishing conditions under surface plastic deformation. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2015, no. 4, pp. 48–52. (In Russ.)
 23. Zaides S.A., Pham Dac Phuong. Analytical calculation of residual stresses when hardening cylindrical parts by transverse burnishing. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2015, no. 12, pp. 40–46. (In Russ.)
 24. Zaides S.A., Pham Dac Phuong. Analysis of the stress-strain state of cylindrical parts subjected to transverse flat plate burnishing. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroenii* [Knowledge intensive technology in machine building], 2017, no. 5 (71), pp. 38–43. (In Russ.)
 25. Zaides S.A., Pham Dac Phuong. Analysing the quality of cylindrical parts subjected to transverse flat plate burnishing. *Uprochnyyayushchie tekhnologii i pokrytiya* [Hardening technology and coatings], 2016, no. 7 (139), pp. 14–18. (In Russ.)
 26. Zaides S.A., Pham Dac Phuong. *Ustroystvo dlya obkatyvaniya tsilindricheskikh izdeliy ploskimi instrumentami* [Machine for rolling cylindrical parts with flat tools]. Patent RF, no. 2600302, 2016.
 27. Zaides S.A., Nguyen Van Hinh. Analysing the quality of the surface layer under reversible surface plastic deformation. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2016, no. 6, pp. 34–40. (In Russ.)
 28. Zaides S.A., Nguyen Van Hinh. Effect of the oscillatory burnishing regimes on the roughness of hardened surfaces. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2017, vol. 21, no. 4, pp. 22–29. (In Russ.)
 29. *Obrabotka detalej poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem: monografiya* [Use of surface plastic deformation as a finishing technique for machine parts: monograph]. Ed. by S.A. Zaides. Irkutsk: Publishing House of Irkutsk State Technical University, 2014, 559 p. (In Russ.)
 30. Schneider Yu.G. *Tekhnologiya finishnoy obrabotki davleniem: spravochnik* [The process of steel part finishing: Handbook]. Saint Petersburg: Politekhnika, 1988, 414 p. (In Russ.)
 31. Fridman Ya.B. *Mekhanicheskie svoystva materialov: v 2 ch.* [Mechanical properties of materials: in two parts]. Moscow: Mashinostroenie, 1974. Part 1: Deformation and fracture. 472 p. (In Russ.)
 32. Ryzhov E.V., Suslov A.G., Fedorov V.P. *Tekhnologicheskoe obespechenie ekspluatatsionnykh svoystv detaley mashin* [Process parameters securing the performance of machine parts]. Moscow: Mashinostroenie, 1979, 176 p. (In Russ.)
 33. Smelyansky V.M. *Mekhanika uprochneniya detalej poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem* [The mechanics of machine part hardening through surface plastic deformation]. Moscow: Mashinostroenie, 2002, 299 p. (In Russ.)
 34. Zhasimov M.M. *Upravlenie kachestvom detaley pri poverkhnostnom plasticheskom deformirovaniyu* [Quality control of machine parts subjected to surface plastic deformation]. Alma-Ata: Nauka, 1986, 205 p. (In Russ.)
 35. Zaides S.A., Nguyen Van Hinh. Effect of the oscillatory burnishing regimes on the roughness of hardened surfaces. *Vestnik IrGTU* [Proceedings of Irkutsk State Technical University], 2017, no. 4, pp. 22–29. (In Russ.)

Received 02/03/18

Accepted 07/05/18

Образец для цитирования

Зайдес С.А. Новые способы поверхностного пластического деформирования при изготовлении деталей машин // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2018. Т.16. №3. С. 129–139. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-129-139>

For citation

Zaydes S.A. New surface plastic deformation techniques in the manufacture of machine parts. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University]. 2018, vol. 16, no. 3, pp. 129–139. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2018-16-3-129-139>