



Оригинальная статья

УДК 621.787.4

DOI 10.17073/0368-0797-2021-5-330-336



ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА КАЛИБРОВАННОЙ СТАЛИ ПОВЕРХНОСТНЫМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ. ЧАСТЬ 2. ВЛИЯНИЕ ОХВАТЫВАЮЩЕГО ПОВЕРХНОСТНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПРУТКАХ

С. А. Зайдес, Фам Ван Ань, Л. Г. Климова

Иркутский национальный исследовательский технический университет (Россия, 664074, Иркутск, ул. Лермонтова, 83)

Аннотация. Холоднотянутый металл по сравнению с горячекатаным обладает рядом неоспоримых преимуществ. Повышенная твердость, высокое качество поверхности, стабильность диаметрального размера по длине заготовки являются основанием для выбора калиброванного металла в качестве эффективных заготовок для изготовления длинномерных деталей типа валов, осей, штанг. Такие заготовки в ряде случаев требуют выполнения небольшого объема механической обработки, например, нарезание резьбы или изготовление шеек на концах прутка. Более широкому использованию калиброванного металла препятствуют остаточные напряжения, которые формируются при его изготовлении. В первой части этой статьи предложено использовать малые пластические деформации для управления остаточными напряжениями. На примере нового процесса поверхностного пластического деформирования, который назвали орбитальным выглаживанием, определены рабочие и остаточные напряжения в цилиндрических заготовках. Во второй части статьи рассматривается процесс охватывающего поверхностного пластического деформирования, который при высокой производительности позволяет снижать остаточные напряжения растяжения в калиброванном металле или формировать в поверхностных слоях заготовки напряжения сжатия. Изложена методика экспериментального определения остаточных напряжений в объеме тела, основанная на послойном удалении внутренних и наружных слоев цилиндрических образцов. Установлено влияние основных параметров процесса охватывающего деформирования на компоненты тензора остаточных напряжений. Выявлен диапазон относительных обжатий (0,1 – 1,0 %), при котором в поверхностных слоях заготовки формируются остаточные напряжения сжатия. Установлено, что при относительном обжатии 0,5 % создаются максимальные по величине остаточные напряжения сжатия. Положительное влияние на остаточное напряженное состояние оказывает охватывающее поверхностное деформирование и на холоднотянутый металл – остаточные напряжения растяжения можно уменьшить, снять или преобразовать в сжимающие.

Ключевые слова: охватывающее деформирование, матрица, остаточные напряжения, калиброванная сталь, относительное обжатие, угол рабочего конуса, калибрующая зона

Для цитирования: Зайдес С.А., Фам Ван Ань, Климова Л.Г. Повышение качества калиброванной стали поверхностным деформированием. Часть 2. Влияние охватывающего поверхностного деформирования на остаточные напряжения в цилиндрических прутках // Известия вузов. Черная металлургия. 2021. Т. 64. № 5. С. 330–336. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-5-330-336>

Original article

QUALITY IMPROVEMENT OF CALIBRATED STEEL BY SURFACE DEFORMATION. PART 2. EFFECT OF ENVELOPING SURFACE DEFORMATION ON RESIDUAL STRESSES IN CYLINDRICAL BARS

S. A. Zaides, Pham Van Anh, L. G. Klimova

Irkutsk National Research Technical University (83 Lermonotova Str., Irkutsk 664074, Russian Federation)

Abstract. Cold-drawn metal has a number of undeniable advantages over the hot-rolled one. Increased hardness, high surface quality, stability of the diametrical dimension along the length of the workpiece are the basis for choosing calibrated metal as effective workpieces for the manufacture of long parts such as shafts, axles, and rods. In some cases, such workpieces require a small amount of machining, for example, threading or making necks at the ends of a bar. The wider use of the calibrated metal is hindered by residual stresses that are formed during its manufacture. In the first part of this article, it was proposed to use small plastic deformations to control residual stresses. By the example of a new process of surface plastic deformation, which is called orbital burnishing, the working and residual stresses in cylindrical workpieces are determined. In the second part of the article, the process of enveloping surface plastic deformation is considered, which, at high productivity, makes it possible to reduce the residual tensile stresses in the calibrated metal or form the surface layers of the workpiece compressive stress. A technique for the experimental determination of residual stresses in the volume of a body is based on layer-by-layer removal of the inner and outer layers of cylindrical samples. Influence of the main parameters of

the enveloping deformation process on the components of the residual stress tensor is established. A range of relative compressions (0.1 – 1.0 %) is revealed, at which residual compressive stresses are formed in the surface layers of the workpiece. It was found that at a relative compression of 0.5 %, the maximum residual compression stresses are created. Enveloping surface deformation has a positive effect on the residual stress state and on cold-drawn metal – the residual tensile stresses can be reduced, removed or converted into compressive ones.

Keywords: enveloping deformation, matrix, residual stresses, calibrated steel, relative reduction, working cone angle, gauge zone

For citation: Zaides S.A., Pham Van Anh, Klimova L.G. Quality improvement of calibrated steel by surface deformation. Part 2. Effect of enveloping surface deformation on residual stresses in cylindrical bars. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2021, vol. 64, no. 5, pp. 330–336. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2021-5-330-336>

ВВЕДЕНИЕ

Калиброванный металл по сравнению с горячекатаным обладает рядом неоспоримых преимуществ: высокое качество поверхностного слоя, стабильность диаметрального размера по длине прутков, повышенные физико-механические свойства поверхностного слоя [1 – 4]. Благодаря этим достоинствам холоднотянутый металл нередко используют в качестве эффективных заготовок для изготовления длинномерных деталей типа валов, осей, валиков, штанг. Калиброванная сталь нашла широкое применение в качестве заготовок при изготовлении деталей на станках-автоматах и автоматических линиях. Диаметральная точность и низкая шероховатость поверхности обеспечивают надежное закрепление заготовок в цанговых патронах металлорежущих станков.

Несмотря на перечисленные достоинства, калиброванный металл имеет существенный недостаток, который в ряде случаев ограничивает возможности его использования на производстве. Таким недостатком является нестабильность геометрической формы цилиндрических прутков, которая проявляется в их искривлении и поводках. Искажение формы происходит не только при механической обработке калиброванных прутков, но даже при их хранении, а также при сборке и эксплуатации машин и механизмов. Этому явлению особенно подвержены длинномерные цилиндрические детали малой жесткости [5 – 9].

На производстве пытались решить проблему искривления заготовок, используя разные способы их закрепления при обработке, разные условия хранения между операциями, но положительных результатов получить не удалось. Целенаправленное экспериментальное исследование этого вопроса позволило установить, что причиной искривления и искажения формы холоднотянутых прутков являются остаточные напряжения, формирующиеся при холодной пластической деформации металла [10].

Поскольку неравномерность пластических деформаций в объеме заготовки является основной причиной образования технологических остаточных напряжений [10, 11], то для их изменения предлагается использовать малые пластические деформации в поверхностных слоях, которые можно сформировать дополнительной обработкой поверхностным деформированием.

В технологии машиностроения известны отделочно-упрочняющие процессы на основе поверхностного пластического деформирования (ППД), позволяющие сформировать в периферийных слоях цилиндрических деталей остаточные напряжения сжатия. Такие напряжения противоположны по характеру распределения остаточным напряжениям в калиброванных прутках.

В первой части статьи рассмотрен новый процесс на основе орбитального ППД, который целесообразно использовать для обработки коротких по длине заготовок. Но для поверхностного деформирования длинномерных прутков такой процесс является малоэффективным, так как обладает низкой производительностью.

Целью данной работы является оценка возможности использования охватывающей схемы поверхностного пластического деформирования для формирования благоприятных остаточных напряжений или снижения растягивающих напряжений в поверхностных слоях калиброванного металла.

ОСОБЕННОСТИ ОХВАТЫВАЮЩЕГО ДЕФОРМАЦИОННОГО УПРочНЕНИЯ

Методы поверхностного пластического деформирования реализуются, в основном, с использованием инструментов с локальными инденторами [12 – 16]. Для этого на предшествующей механической операции необходимо создать достаточно высокое качество поверхностного слоя. В первую очередь это касается шероховатости поверхности. Локальным методом поверхностного упрочнения свойственна нестабильность деформации при обработке нежестких заготовок, шелушение упрочненного слоя, в ряде случаев незначительное изменение физико-механических свойств обрабатываемого материала. Большинство деформирующих методов локального упрочнения отличается низкой производительностью, особенно при обработке нежестких длинномерных деталей типа валов, осей, штанг, штоков, валиков [17 – 21].

Для поверхностного пластического деформирования нежестких длинномерных заготовок разработан технологический процесс охватывающего упрочнения, основанный на упругопластическом осесимметричном деформировании ограниченной части заготовки при непрерывном поступательном ее перемещении относительно продольной оси [9].

В качестве рабочего деформирующего инструмента при этом используют кольцевой индентор – матрицу. Рабочий инструмент состоит из трех основных частей:

- рабочей, имеющей форму усеченного конуса, в которую поступает и формоизменяется заготовка;
- калибрующей (цилиндрической) части, предназначенной для выравнивания напряженного состояния и обеспечения качества поверхности заготовки;
- выходной части в виде обратного конуса, служащего в основном для предохранения рабочего канала инструмента от повреждений [9].

Таким образом, основными параметрами охватывающего поверхностного пластического деформирования являются геометрия рабочего канала инструмента и степень относительного обжатия Q , определяемая по формуле

$$Q = \frac{D_n^2 - D_k^2}{D_n^2} 100 \%, \quad (1)$$

где D_n, D_k – диаметр заготовки до и после деформирования.

МЕТОДИКА ОПРЕДЕЛЕНИЯ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Для определения остаточных напряжений в сплошных цилиндрических заготовках использован метод растачивания и обтачивания одного цилиндра, разработанный Г. Заксом и модифицированный Л.А. Гликманом и А.Н. Бабаевым [9]. В основе метода лежат происходящие изменения тангенциальных и осевых деформаций цилиндра при последовательном удалении внутренних (наружных) концентрических слоев металла. По результатам измерения деформаций в осевом и радиальном направлении цилиндрического образца рассчитывали главные компоненты тензора остаточных напряжений.

Исследования выполнены на цилиндрических образцах из стали АС14 вследствие ее предрасположенности к трещинообразованию при обработке давлением и резанием, что объясняется формированием значительных остаточных напряжений [22]. Остаточные напряжения определяли в цилиндрических заготовках диаметром 38 мм, деформированных в заводских и лабораторных условиях.

Для проведения лабораторных исследований заготовки длиной 400 мм калибровали на гидравлической машине ГРМ-1, а в заводских условиях прутки длиной шесть метров протягивали на калибровочных машинах (ИЗТМ). В качестве рабочего инструмента использовали твердосплавные матрицы (ВК8), запрессованные в стальные обоймы. В качестве технологической смазки при калибровке прутков применяли масло индустриальное И-40А (ГОСТ 20799-75).

Для удаления внутренних и наружных концентрических слоев цилиндрических образцов использовали

механический разрушающий способ: сверление и последующее растачивание и обтачивание. Деформации цилиндрических образцов при удалении слоев металла измеряли микроиндикаторами часового типа [9].

ВЛИЯНИЕ ОСНОВНЫХ ПАРАМЕТРОВ ОХВАТЫВАЮЩЕГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ НА ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ В ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ПРУТКАХ

Исследования выполнены на отожженных образцах, что исключало наличие начальных остаточных напряжений в металле.

Степень относительного обжатия. Для определения влияния степени относительного обжатия на остаточные напряжения, заготовки из стали АС14 диаметром 38 мм упрочняли охватывающим деформированием через матрицу с углом рабочего конуса 8° и длиной калибрующей части 4 мм. Для определения интервала обжатий, при котором в поверхностных слоях деформированных прутков формируются остаточные напряжения сжатия, эксперименты были выполнены с относительными обжатиями от 0,1 до 5,0 %.

Установлено, что величина и характер распределения всех составляющих остаточных напряжений в значительной мере зависит от степени относительного обжатия (рис. 1). После обобщения полученных результатов исследования, на рис. 2 представлены кривые, показывающие влияние степени относительного обжатия на осевые остаточные напряжения на поверхности прутков, упрочненных охватывающим ППД.

В интервале относительных обжатий от 0,1 до 1,0 % в поверхностных слоях цилиндрических прутков формируются остаточные напряжения сжатия, а при

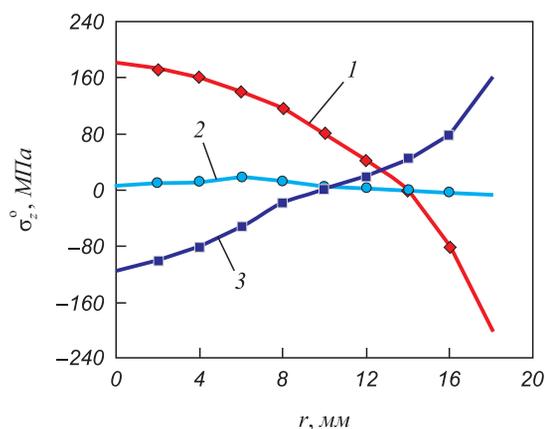


Рис. 1. Распределение осевых σ_z^o остаточных напряжений по радиусу упрочненных прутков:
1 – $Q = 0,27\%$; 2 – $Q = 1,0\%$; 3 – $Q = 2,0\%$

Fig. 1. Distribution of axial residual stresses σ_z^o over the cross-section of hardened bars:
1 – $Q = 0,27\%$; 2 – $Q = 1,0\%$; 3 – $Q = 2,0\%$

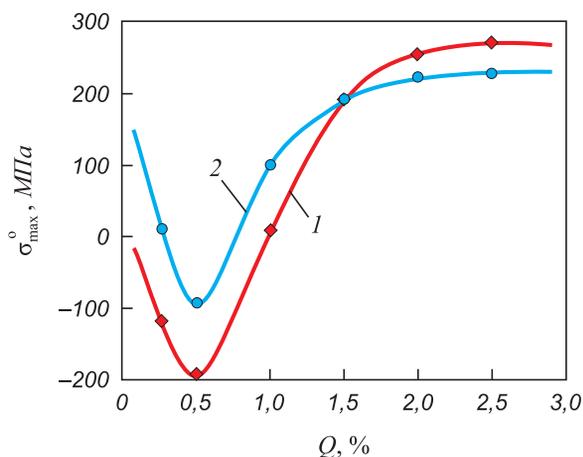


Рис. 2. Влияние степени относительного обжатия на максимальные значения осевых остаточных напряжений:

1 – прутки без начальных остаточных напряжений (отожженные);
2 – калиброванные прутки (с обжатием $Q = 18\%$)

Fig. 2. Influence of the relative reduction degree on the maximum values of axial residual stresses:

1 – annealed rods; 2 – calibrated rods ($Q = 18\%$)

$Q > 1,0\%$ – растяжения. Причем при относительных обжатиях в интервале 0,4 – 0,6 % формируются максимальные остаточные напряжения сжатия (см. рис. 2). С увеличением степени относительного обжатия более 3 % характер изменения остаточных напряжений становится более монотонным.

Геометрия рабочего канала инструмента. Основными геометрическими параметрами матрицы являются угол рабочего конуса и длина калибрующей части. Для определения их влияния на остаточное напряженное состояние упрочненных стальных прутков была подготовлена серия рабочих матриц (сталь ШХ-15), которые отличались указанными параметрами.

Установлено, что в исследуемом диапазоне геометрических параметров матрицы ($\alpha = 6 - 15^\circ$; $l_k = 0,1 - 15$ мм) в поверхностных слоях глубиной до 5 – 6 мм формируются остаточные напряжения сжатия, имеющие максимальные значения на поверхности цилиндрических образцов.

По результатам обобщения экспериментальных результатов установлено, что при увеличении рабочего угла матрицы α от 6 до 15° максимальные осевые и тангенциальные остаточные напряжения сжатия снижаются, а с увеличением длины калибрующей части матрицы – увеличиваются [9].

ТЕХНОЛОГИЧЕСКАЯ НАСЛЕДСТВЕННОСТЬ

ПРИ ФОРМИРОВАНИИ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ

Рассмотрим, как влияет процесс охватывающего ППД на изменение остаточного напряженного состояния в калиброванных прутках, которые после обработки обычно имеют растягивающие остаточные напряжения в поверхностных слоях.

Степень относительного обжатия. Учитывая, что охватывающее поверхностное пластическое деформирование оказывает эффективное влияние на изменения величины и характера распределения остаточных напряжений, было сделано предположение о возможности его применения для изменения остаточного напряженного состояния заготовок, полученных холодным деформированием.

Выполненные экспериментальные исследования подтвердили положительное воздействие охватывающего ППД. Так, при относительном обжатии величиной 0,30 % максимальные тангенциальные напряжения растяжения в калиброванном металле снизились в три, а осевые – в два раза (рис. 3). Кроме того, изменился и характер распределения остаточных напряжений по поперечному сечению калиброванных прутков. Максимальные осевые остаточные напряжения растяжения в поверхностных слоях (+250 МПа) преобразовались в напряжения сжатия (–240 МПа). Эксперименты, выполненные в заводских условиях, подтвердили лабораторные результаты. Так, в калиброванных заготовках,

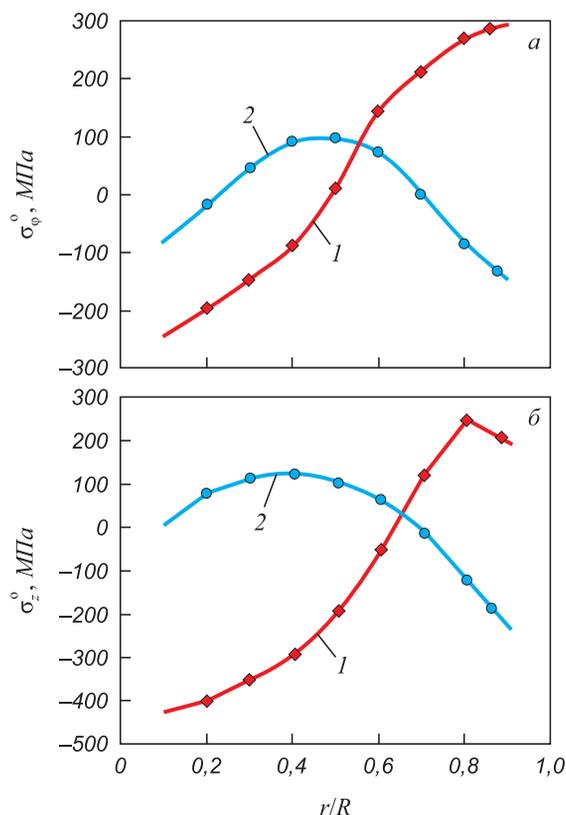


Рис. 3. Распределение тангенциальных (а) и осевых (б) остаточных напряжений по радиусу упрочненных заготовок:

1 – напряжения в исходной (калиброванной) заготовке;
2 – напряжения в заготовке после дополнительного охватывающего ППД с относительным обжатием 0,3 % r/R

Fig. 3. Distribution of tangential (a) and axial (b) residual stresses over the cross-section of hardened workpieces during enveloping deformation:

1 – in original workpiece; 2 – after enveloping deformation with a compression of 0.3 % r/R

упрочненных дополнительно с относительным обжатием 0,15 и 0,68 %, максимальные осевые растягивающие остаточные напряжения снизились, соответственно, с 270 до 91 и 190 МПа, а тангенциальные – с 300 до 140 и 180 МПа [9]. В данном случае также происходит значительное снижение начальных остаточных напряжений, но без изменения характера их распределения. После обобщения результатов исследования были построены кривые, показывающие изменение остаточных напряжений в калиброванном металле при использовании дополнительной обработки охватывающим ППД (см. рис. 2). Максимальные остаточные напряжения растяжения в заготовках после предшествующей технологической операции (калибровки) составляли 225 МПа. Для изменения остаточного напряженного состояния калиброванные заготовки упрочняли охватывающим деформированием с обжатиями в пределах от 0,1 до 2,0 %. Экспериментально установлено (см. рис. 2), что при охватывающем ППД имеются два значения относительных обжатий, при которых начальные остаточные напряжения снижаются до нуля. Из графика на рис. 2 установлен также диапазон относительных обжатий (0,15 – 0,60 %), при котором в заготовках формируются остаточные напряжения сжатия.

Совмещение технологических переходов. Предлагаемый способ изменения остаточных напряжений в калиброванном металле основан на использовании дополнительной технологической операции. Для повышения производительности технологического процесса калибровки охватывающее деформирование целесообразно совмещать с основным технологическим процессом путем использования рабочего инструмента в виде сдвоенных матриц. Рассмотрим влияние совмещенного перехода на остаточное напряженное состояние в образцах, упрочненных с относительным обжатием 18 %, а затем дополнительно с относительным обжатием 0,72 %.

При раздельном деформировании за два перехода максимальные значения тангенциальных остаточных напряжений растяжения снизились с 250 до 100 МПа (рис. 4), а осевых – с 210 до 80 МПа [9]. При охватывающем деформировании за один переход с помощью сдвоенной матрицы в периферийных слоях заготовки сформировались тангенциальные напряжения сжатия (–100 МПа, см. рис. 4), а уровень осевых напряжений растяжения снизился до 120 МПа [9].

В заключении следует отметить, что процесс охватывающего упрочнения, который в производственных условиях можно реализовывать на калибровочных станках, является суперпроизводительным по сравнению с процессами, основанными на использовании локальных инденторов (шарики, ролики, алмазные выглаживатели). Так, если при обкатывании роликом использовать продольную подачу величиной 0,1 мм/об при частоте вращения заготовки 500 об/мин, а скорость перемещения заготовки на калибровочном стане принять

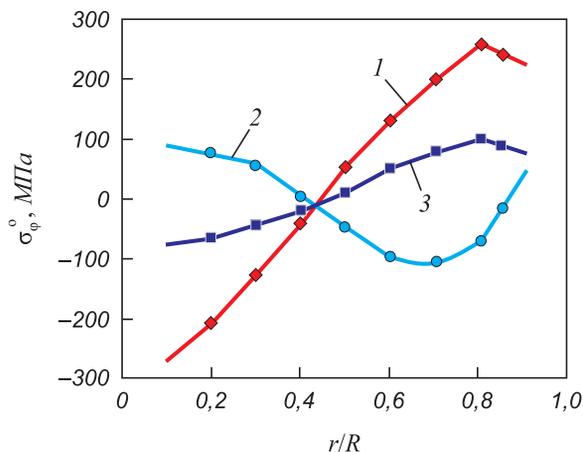


Рис. 4. Распределение тангенциальных остаточных напряжений по радиусу калиброванных прутков:
1 – исходный калиброванный металл ($Q = 18\%$); 2 – охватывающее деформирование калиброванного металла через сдвоенную матрицу; 3 – охватывающее деформирование калиброванного металла за два перехода

Fig. 4. Curves of tangential residual stresses distribution over the cross-section of calibrated bars:
1 – calibrated metal ($Q = 18\%$); 2 – enveloping deformation of the calibrated metal through a double matrix; 3 – enveloping deformation of the calibrated metal in two transitions

10 м/мин, то указанные процессы по производительности будут отличаться в 200 раз.

Следует также отметить и поля распределения остаточных напряжений сжатия в зависимости от способов деформирования. При охватывающем деформировании глубина залегания остаточных напряжений сжатия в 4 – 6 раз выше, чем при локальном упрочнении [19], что позволяет использовать этот технологический процесс для изменения остаточных напряжений в калиброванном металле.

Выводы

Для отделочно-упрочняющей обработки длинномерных цилиндрических деталей предложен технологический процесс, основанный на охватывающем деформировании заготовок. Экспериментально установлен диапазон относительных обжатий в пределах от 0,1 до 1,0 %, при котором в поверхностных слоях заготовки формируются осевые и тангенциальные остаточные напряжения сжатия.

Установлена роль геометрии рабочего канала инструмента на формирование остаточных напряжений. Подтверждено, что с увеличением угла рабочего конуса инструмента все главные компоненты тензора остаточных напряжений повышаются. Установлено влияние калибрующей части инструмента на остаточные напряжения – с ее увеличением остаточное напряженное состояние снижается.

Охватывающее поверхностное пластическое деформирование целесообразно использовать для изменения

остаточных напряжений в калиброванном металле. Так, при степени относительного обжатия в интервале от 0,15 до 0,6 % в поверхностных слоях цилиндрических прутков формируются остаточные напряжения сжатия.

Для повышения производительности технологического процесса целесообразно использовать сдвоенные матрицы, обеспечивающие охватывающее деформирование в основном процессе калибровки металла.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

REFERENCES

1. Кандауров Е.Л., Кривошеков С.В., Носов А.Д., Бахчиев Д.Н., Алексеев А.Н. Перспективы производства калиброванного проката // *Сталь*. 2005. № 1. С. 70–71.
2. Корчунов А.Г., Рудаков В.П., Пивоварова К.Г. Влияние способа обработки на состояние поверхности калиброванного металла // *Вестник МГТУ им. Г.И. Носова*. 2003. № 3. С. 41–42.
3. Вершигора С.М., Черняк А.А., Рудаков В.П., Чупин А.А. Совершенствование производства калиброванного и обточенного проката из автоматных и легированных сталей // *Сталь*. 2004. № 2. С. 39–40.
4. Totten G., Howes M., Inoue T. *Handbook of residual stress and deformation of steel*. USA: ASM International, Materials Park, Ohio, 2002. 500 p.
5. Swic A., Taranenko V., Wolos D. New method for machining of low-rigidity shafts // *Advances in Manufacturing Science and Technology*. 2010. Vol. 34. No. 1. P. 59–71.
6. Bisu C.-F., K'Nevez J.Y., Darnis P., Laheurte R., Gerard A. New method to characterize a machining system: application in turning // *International Journal of Material Forming*. 2009. Vol. 2. No. 2. P. 93–105. <http://doi.org/10.1007/s12289-009-0395-y>
7. Drachev O.I., Bobrovskii A.V. Automatic stabilization systems of the non-rigid shafts in turning work // *AER – Advances in Engineering Research*. 2018. Vol. 158. P. 104–108.
8. Drachev O.I., Bobrovskii A.V., Zotov A.V. Improving the accuracy of machining of non-rigid shaft // *MATEC Web of Conferences*. 2018. Vol. 224. Article 01085. <http://doi.org/10.1051/mateconf/201822401085>
9. Зайдес С.А. Охватывающее поверхностное пластическое деформирование. Иркутск: Изд-во Иркутского государственного технического университета, 2001. 309 с.
10. Блюменштейн В.Ю., Махалов М.С. Расчетная модель остаточных напряжений упрочненного поверхностного слоя после обработки поверхностным пластическим деформированием // *Упрочняющие технологии и покрытия*. 2013. № 4 (100). С. 12–20.
11. Rakhimyanov Kh.M., Rakhimyanov K.Kh., Rakhimyanov A.Kh. Estimating the parameters of deformation action by ultrasonic surface hardening of metals // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 253. No. 1. Article 012032. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/253/1/012032>
12. Григорьев С.Н., Кропоткина Е.Ю. Выбор оптимального способа поверхностного пластического деформирования // *Вестник МГТУ Станкин*. 2012. № 2. С. 144–147.
13. Rakhimyanov Kh.M., Semenova Yu.S., Eremina A.S. Technological restrictions on mode parameters of ultrasonic plastic deforming // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017. Vol. 253. No. 1. Article 012030. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/253/1/012030>
14. Tamarkin M., Tischenko E., Kazakov D. The research process of the finishing strengthening centrifugal and rotary processing method of parts considering the reliability assurance of the technology process // *2017 International Conference on Mechanical, System and Control Engineering, ICMSC*. 2017. P. 31–35. <http://doi.org/10.1109/ICMSC.2017.7959437>
15. Зайдес С.А., Лэ Хонг Куанг. Правка маложестких цилиндрических деталей. Часть 2. Напряженное состояние цилиндрических заготовок при поперечной обкатке плоскими плитами // *Известия вузов. Черная металлургия*. 2019. Т. 62. № 9. С. 674–680. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-9-674-680>
1. Kandaurov E.L., Krivoshechekov S.V., Nosov A.D., Bakhchiev D.N., Alekseev A.N. Prospects for manufacturing the sized rolled products. *Stal'*. 2005, no. 1, pp. 70–71. (In Russ.).
2. Korchunov A.G., Rudakov V.P., Pivovarova K.G. Influence of the processing method on state of the calibrated metal surface. *Vestnik MGTU im. G.I. Nosova*. 2003, no. 3, pp. 41–42. (In Russ.).
3. Vershigora S.M., Chernyak A.A., Rudakov V.P., Chupin A.A. Improvement in manufacturing the sized rolled products. *Stal'*. 2004, no. 2, pp. 39–40. (In Russ.).
4. Totten G., Howes M., Inoue T. *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*. ASM International, Materials Park, Ohio, 2002, 500 p.
5. Swic A., Taranenko V., Wolos D. New method for machining of low-rigidity shafts. *Advances in Manufacturing Science and Technology*. 2010, vol. 34, no. 1, pp. 59–71.
6. Bisu C.-F., K'Nevez J.Y., Darnis P., Laheurte R., Gerard A. New method to characterize a machining system: application in turning. *International Journal of Material Forming*. 2009, vol. 2, no. 2, pp. 93–105. <http://doi.org/10.1007/s12289-009-0395-y>
7. Drachev O.I., Bobrovskii A.V. Automatic stabilization systems of the non-rigid shafts in turning work. *AER – Advances in Engineering Research*. 2018, vol. 158, pp. 104–108.
8. Drachev O.I., Bobrovskii A.V., Zotov A.V. Improving the accuracy of machining of non-rigid shaft. *MATEC Web of Conferences*. 2018, vol. 224, article 01085. <http://doi.org/10.1051/mateconf/201822401085>
9. Zaides S.A. *Enveloping Surface Plastic Deformation*. Irkutsk: IrSTU, 2001, 309 p.
10. Blumenstein V.Yu., Makhhalov M.S. Computational model of residual stresses of a hardened surface layer after surface plastic deformation. *Uprochnyayushchie tekhnologii i pokrytiya*. 2013, no. 4 (100), pp. 12–20. (In Russ.).
11. Rakhimyanov Kh.M., Rakhimyanov K.Kh., Rakhimyanov A.Kh. Estimating the parameters of deformation action by ultrasonic surface hardening of metals. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017, vol. 253, no. 1, article 012032. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/253/1/012032>
12. Grigor'ev S.N., Kropotkina E.Yu. The choice of the optimal method for surface plastic deformation. *Vestnik MGTU Stankin*. 2012, no. 2, pp. 144–147. (In Russ.).
13. Rakhimyanov Kh.M., Semenova Yu.S., Eremina A.S. Technological restrictions on mode parameters of ultrasonic plastic deforming. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017, vol. 253, no. 1, article 012030. <http://doi.org/10.1088/1757-899X/253/1/012030>
14. Tamarkin M., Tischenko E., Kazakov D. The research process of the finishing strengthening centrifugal and rotary processing method of parts considering the reliability assurance of the technology process. *2017 Int. Conf. on Mechanical, System and Control Engineering, ICMSC*. 2017, pp. 31–35. <http://doi.org/10.1109/ICMSC.2017.7959437>
15. Zaides S.A., Le Khong Kuang. Straightening of low-rigid cylindrical details. Part 2. Stressed state of cylindrical billets at transverse cheeing by flat plates. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2019, vol. 62, no. 9, pp. 674–680. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2019-9-674-680>

16. Зайдес С.А., Нго Као Кыонг. Новые технологические возможности отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием // Научные технологии в машиностроении. 2017. № 3 (69). С. 25–30.
17. Tiitto S. Magnetic Methods // Handbook of Measurement of Residual Stresses. Lu J. ed. Lilburn, GA: Society for Experimental Mechanics, 1996. P. 179–224.
18. Smolentsev V.P., Kirillov O.N., Fedonin O.N., Ryazantsev A.Yu. Combined finish machining of nonrigid parts by brush electrode // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 177. Article 012009. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/177/1/012009>
19. Зайдес С.А., Фам Ван Ань. Повышение качества калиброванной стали поверхностным деформированием. Часть 1. Определение напряженного состояния цилиндрических деталей при орбитальном поверхностном деформировании // Известия вузов. Черная металлургия. 2020. Т. 63. № 10. С. 802–807. <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-10-802-807>
20. Mahalov M.S., Blumenstein V.Yu. Finite element surface layer inheritable condition residual stresses model in surface plastic deformation processes // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2016. Vol. 126. Article 012004. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/126/1/012004>
21. Ebert L.J. The role of residual stresses in the mechanical performance of case carburized steel // Metallurgical and Materials Transactions A. 1978. Vol. 9. No. 11. P. 1537–1551. <https://doi.org/10.1007/BF02661936>
22. Марочник сталей и сплавов / А.С. Зубченко, М.М. Колосков, Ю.В. Каширский и др. Под общей ред. А.С. Зубченко. М.: Машиностроение, 2003. 784 с.
16. Zaides S.A., Ngo Kao Kyong. New technological possibilities of finishing and hardening treatment by surface plastic deformation. *Naukoemkie tekhnologii v mashinostroyenii*. 2017, no. 3 (69), pp. 25–30. (In Russ.).
17. Tiitto S. Magnetic Methods. In: *Handbook of Measurement of Residual Stresses*. Lu J. ed. Lilburn, GA: Society for Experimental Mechanics, 1996, pp. 179–224.
18. Smolentsev V.P., Kirillov O.N., Fedonin O.N., Ryazantsev A.Yu. Combined finish machining of nonrigid parts by brush electrode. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2017, vol. 177, article 012009. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/177/1/012009>
19. Zaides S.A., Pham Van Anh. Quality improvement of calibrated steel by surface deformation. Part 1. Determination of the stressed state of cylindrical parts during orbital surface deformation. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2020, vol. 63, no. 10, pp. 802–807. (In Russ.). <https://doi.org/10.17073/0368-0797-2020-10-802-807>
20. Mahalov M.S., Blumenstein V.Yu. Finite element surface layer inheritable condition residual stresses model in surface plastic deformation processes. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. 2016, vol. 126, no. 1, article 012004. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/126/1/012004>
21. Ebert L.J. The role of residual stresses in the mechanical performance of case carburized steel. *Metallurgical and Materials Transactions A*. 1978, vol. 9, no. 11, pp. 1537–1551. <https://doi.org/10.1007/BF02661936>
22. Zubchenko A.S., Koloskov M.M., Kashirskii Yu.V., etc. *Grade Guide of Steels and Alloys*. Zubchenko A.S. ed. Moscow: Mashinostroyenie, 2003, 784 p. (In Russ.).

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Семен Азикович Зайдес, д.т.н., профессор, заведующий кафедрой машиностроительных технологий и материалов, Иркутский национальный исследовательский технический университет
E-mail: zsa@istu.edu

Фам Ван Ань, аспирант кафедры машиностроительных технологий и материалов, Иркутский национальный исследовательский технический университет
E-mail: vananhtdh0202@gmail.com

Лариса Генриховна Климова, к.т.н., доцент кафедры инженерной и компьютерной графики, Иркутский национальный исследовательский технический университет
E-mail: larisgoko@yandex.ru

Semen A. Zaides, Dr. Sci. (Eng.), Prof., Head of the Chair “Engineering Technology and Materials”, Irkutsk National Research Technical University
E-mail: zsa@istu.edu

Pham Van Anh, Postgraduate of the Chair “Engineering Technology and Materials”, Irkutsk National Research Technical University
E-mail: vananhtdh0202@gmail.com

Larisa G. Klimova, Cand. Sci. (Eng.), Assist. Prof. of the Chair “Engineering and Computer Graphics”, Irkutsk National Research Technical University
E-mail: larisgoko@yandex.ru

Поступила в редакцию 12.01.2021
 После доработки 18.02.2021
 Принята к публикации 16.04.2021

Received 12.01.2021
 Revised 18.02.2021
 Accepted 16.04.2021