

УДК 621.787.4

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА КАЛИБРОВАННОЙ СТАЛИ ПОВЕРХНОСТНЫМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ. ЧАСТЬ 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ НАПРЯЖЕННОГО СОСТОЯНИЯ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ДЕТАЛЕЙ ПРИ ОРБИТАЛЬНОМ ПОВЕРХНОСТНОМ ДЕФОРМИРОВАНИИ

*Зайдес С.А., д.т.н., профессор, заведующий кафедрой машиностроительных технологий
и материалов (zsa@istu.edu)*

*Фам Ван Ань, аспирант кафедры машиностроительных технологий
и материалов (vananhtdh0202@gmail.com)*

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

Аннотация. Холоднотянутая калиброванная сталь является эффективной заготовкой для изготовления маложестких цилиндрических деталей типа валов и осей. Высокая точность диаметрального размера по длине заготовки, малая шероховатость поверхности, повышенная твердость и прочность поверхностного слоя по сравнению с горячекатаным прокатом позволяют изготавливать разнообразные детали с высоким коэффициентом использования металла и при высокой производительности механической обработки. Основным недостатком калиброванного металла заключается в остаточных напряжениях, которые возникают при обработке давлением. Для их снижения или изменения характера распределения по сечению предлагается использовать малые пластические деформации в поверхностном слое проката. Известные в практике способы поверхностного пластического деформирования (ППД) обычно приводят к искривлению маложестких заготовок. Для интенсификации напряженно-деформированного состояния в очаге деформации предлагается способ орбитального поверхностного деформирования. Схема орбитального деформирования представляет собой стержневой индентор (инструмент), один конец которого снабжен шаровым наконечником, находящийся в контакте с обрабатываемой поверхностью. Второй конец стержневого индентора вращается относительно вертикальной оси, образуя в пространстве коническую поверхность с некоторым углом при вершине. Вдоль оси стержня действует деформирующая сила. На основе конечно-элементного моделирования рассмотрено влияние основных параметров орбитального поверхностного деформирования на напряженное состояние в очаге деформации и остаточные напряжения в готовых изделиях. По сравнению с традиционным процессом ППД интенсивность напряжений при орбитальном поверхностном деформировании возрастает на 10 – 15 %. Остаточные напряжения сжатия, которые формируются в поверхностных слоях, достигают 70 – 85 % предела прочности материала. Установлен относительный радиус орбитального вращения и радиус рабочего инструмента, при которых обеспечивается формирование максимальных временных и остаточных напряжений. При увеличении частоты орбитального вращения рабочего инструмента временные и остаточные напряжения сжатия возрастают. Во второй части статьи предполагается представить информацию о более эффективном способе поверхностного деформирования и изменении начальных остаточных напряжений, которые формируются при калибровке цилиндрических прутков.

Ключевые слова: калиброванная сталь, маложесткие цилиндрические детали, поверхностный слой, интенсивность напряжений, остаточные напряжения, напряженное состояние, орбитальное поверхностное деформирование, кинематика рабочего инструмента, конечно-элементное моделирование.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-10-802-807

ВВЕДЕНИЕ

Холоднотянутый калиброванный металл по сравнению с горячекатаным обладает рядом бесспорных преимуществ по механическим свойствам, качеству поверхности и точности диаметрального размера [1, 2]. В этой связи калиброванную сталь широко применяют в качестве эффективных заготовок для изготовления разнообразных деталей машин. В машиностроении известен класс маложестких цилиндрических деталей, у которых длина в 20 и более раз превышает их диаметр. К таким деталям относят рабочие и трансмиссионные валы артезианских турбинных насосов, ходовые валики металлорежущих станков, штоки гидроцилиндров,

валы судовых установок и многие другие детали машин. Использование в качестве заготовок калиброванного проката позволяет не только увеличить коэффициент использования конструкционного материала (так как резко снижаются отходы металла в виде стружки), но и существенно повысить производительность технологического процесса за счет сокращения механических операций по удалению «лишнего» металла.

Достаточно широко используют холоднотянутый прокат в качестве заготовок для изготовления деталей на станках-автоматах и автоматических линиях [1]. Высокая диаметральная точность и стабильность размера по длине заготовки обеспечивает ее надежное закрепление в цанговых патронах, а для образования легко

ломающейся стружки, которая необходима для обеспечения устойчивого процесса резания, разработана специальная «автоматная сталь», в состав которой введено небольшое количество свинца [2].

Несмотря на ряд преимуществ, калиброванная сталь имеет существенный недостаток, который в ряде случаев ограничивает сферу ее применения. Таким недостатком является достаточно высокий уровень растягивающих остаточных напряжений, которые являются причиной неравномерности пластических деформаций при обработке металла давлением [3 – 7]. Практически любая механическая или термическая операция вызывает нарушение равновесия остаточных напряжений, что приводит к искажению формы или искривлению цилиндрических заготовок [3, 8]. В ряде случаев неравномерность остаточных напряжений является причиной повреждения или даже разрушения металла. В производственной практике известны случаи образования «крокодиловой пасти» при запрессовке прутков в волоку, формирование сквозных трещин в сортовом прокате, коррозионное разрушение, образование трещин при механической обработке проката на металлорежущих станках [1, 9 – 13].

В связи с изложенными данными возникает задача по изменению остаточных напряжений в холоднотянутом металле. В производственной практике для этого часто используют термические операции. Однако при обработке длинномерных деталей малой жесткости такие технологии требуют специального термического оборудования. Возникают сложности в обеспечении стабильности распределения температуры при нагреве и охлаждении по длине детали. Кроме этого, при термической обработке повреждается поверхность изделий, снижаются механические характеристики прочности, повышается длительность технологического цикла.

Другой возможностью изменения остаточных напряжений являются малые пластические деформации, которые могут как снизить остаточные напряжения растяжения в поверхностных слоях, так и сформировать остаточные напряжения сжатия, оказывающие обычно положительное влияние на эксплуатационные характеристики изделий машиностроения [5, 14 – 17].

В технологии машиностроения среди отделочно-упрочняющих методов обработки широкое распространение на практике получили способы поверхностного пластического деформирования (ППД), обеспечивающие формирование качественного поверхностного слоя с остаточными напряжениями сжатия [18 – 20]. Однако при обработке нежестких деталей традиционные схемы деформирования оказались малоэффективными, так как большие радиальные силы от деформирующих элементов вызывают изгиб заготовок при обработке, что отрицательно влияет как на форму, так и на качество поверхностного слоя деталей машин.

Цель данной работы – разработка эффективного способа поверхностного пластического деформирования

и определение влияния основных параметров процесса на напряженное состояние в очаге деформации и остаточные напряжения в цилиндрических заготовках.

СХЕМА ОРБИТАЛЬНОГО ПОВЕРХНОСТНОГО ДЕФОРМИРОВАНИЯ

Для снижения остаточных напряжений растяжения или преобразования их в напряжения сжатия необходимо сформировать определенное поле противоположных по знаку остаточных напряжений. Для этих целей требуется создать достаточно высокую интенсивность напряжений в очаге деформации. Традиционные схемы поверхностного деформирования достигают этого за счет повышения величины натяга, но при этом происходит дополнительное искривление маложесткой детали. Ставится задача повысить интенсивность напряжений в очаге деформации без увеличения величины натяга.

На рис. 1 представлена схема поверхностного пластического деформирования на основе орбитального воздействия деформирующего инструмента, которое осуществляется за счет вращения нагруженного индентора относительно оси, перпендикулярной оси заготовки. При этом траектория вращения осевой линии индентора образует в пространстве коническую поверхность с углом при вершине 2α . Новая кинематика рабочего инструмента обеспечивает повышение интенсивности напряжений в зоне нагружения, так как каждый очаг деформации дополнительно, за счет орбитального движения, нагружается рабочим инструментом по сферической поверхности лунки [21].

КОНЕЧНО-ЭЛЕМЕНТНОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ

Для анализа напряженного состояния в очаге деформации при упрочнении различными способами ППД успешно применяется компьютерное моделирование, в основе которого лежит метод конечных элементов (МКЭ). Одной из универсальных и широко применяемых программ, реализующих МКЭ, является ANSYS [22, 23], которая и была использована в данной работе. Для проведения расчетов при ППД построена геометрическая модель в виде цилиндра и стержня с шаровым наконечником.

Параметры моделирования: коэффициент трения в зоне контакта $f = 0,1$; конечно-элементная форма – гексаэдр, сгущение 6333 элемента, 30 520 узлов.

Принятые допущения:

- заготовку моделировали как упругопластическое, а индентор – как абсолютно жесткое тело;
- тепловые явления при деформировании и микрорельеф поверхности не учитываются.

Базовые режимы обработки, которые использовали при оценке влияния параметров орбитального поверхностного деформирования на напряженное состояние в очаге пластической деформации и компоненты

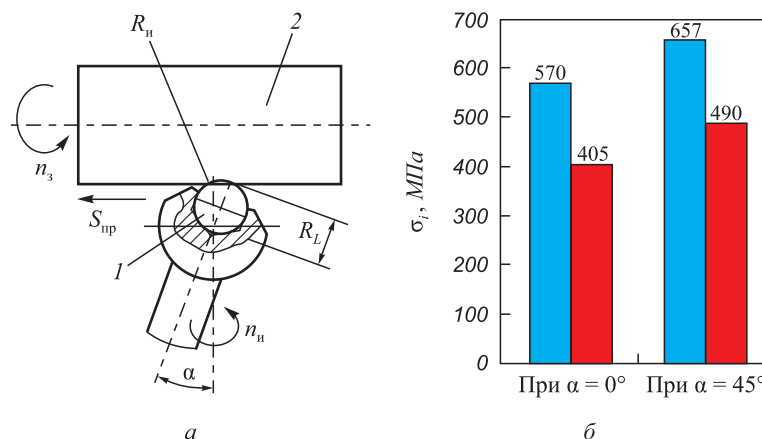


Рис. 1. Схема процесса упрочнения (а) и схема значений интенсивности максимальных напряжений (б) при орбитальном поверхностном деформировании:

1 – рабочий инструмент; 2 – заготовка; n_3 – частота вращения заготовки; α – угол наклона рабочего инструмента; n_i – частота вращения рабочего инструмента; S_{np} – подача инструмента; R_i – радиус инструмента; R_L – радиус орбитального вращения; ■ – максимальные временные напряжения; ■ – максимальные остаточные напряжения сжатия

Fig. 1. Scheme of the hardening process (a) and diagram of the values of maximum stresses intensity (b) during orbital surface deformation 1 – working tool; 2 – workpiece; n_3 – workpiece rotation frequency; α – angle of working tool inclination; n_i – frequency of working tool rotation; S_{np} – tool feed; R_i – radius of the tool; R_L – radius of orbital rotation; ■ – maximum time stresses; ■ – maximum residual compressive stresses

остаточных напряжений в поверхностном слое: частота вращения заготовки $n_3 = 100$ об/мин; угол наклона рабочего инструмента $\alpha = 5^\circ$; частота вращения рабочего инструмента $n_i = 60$ об/мин; величина натяга $t = 0,1$ мм; подача инструмента $S_{np} = 0,11$ мм/об; радиус инструмента $R_i = 4$ мм; радиус орбитального вращения $R_L = 5$ мм.

Напряженное состояние цилиндра в целом оценивали по интенсивности напряжения σ_i , предложенное Мизесом [12]:

$$\sigma_i = \sqrt{\frac{(\sigma_z - \sigma_\phi)^2 + (\sigma_\phi - \sigma_r)^2 + (\sigma_r - \sigma_z)^2}{2}},$$

где σ_r – радиальные; σ_ϕ – тангенциальные; σ_z – осевые напряжения.

Напряженное состояние материала при деформационном упрочнении можно разделить на временное и остаточное. Первое из них возникает при действии внешних сил, второе – при их отсутствии. Временные напряжения влияют на энергосиловые характеристики процесса, степень и глубину упрочненного слоя, давление в зоне контакта, шероховатость поверхности заготовки, прочность и износостойкость деформирующего инструмента, а остаточные напряжения – на усталостную прочность, процессы разрушения, износостойкость, коррозию и другие эксплуатационные свойства изделий.

ностном деформировании (результаты получены при базовых режимах упрочнения).

Установлено, что в процессе орбитального поверхностного деформирования создаются остаточные напряжения сжатия в поверхностном слое и остаточные напряжения растяжения в центральной зоне. Максимальные осевые и тангенциальные остаточные напряжения сжатия формируются на поверхности деталей. Величина осевых остаточных напряжений во всех случаях значительно превышает тангенциальные.

Рассмотрим влияние основных параметров орбитального поверхностного деформирования на интенсивность максимальных напряжений.

Влияние угла наклона (α) и глубины внедрения (t) рабочего инструмента. На рис. 3 представлено влия-

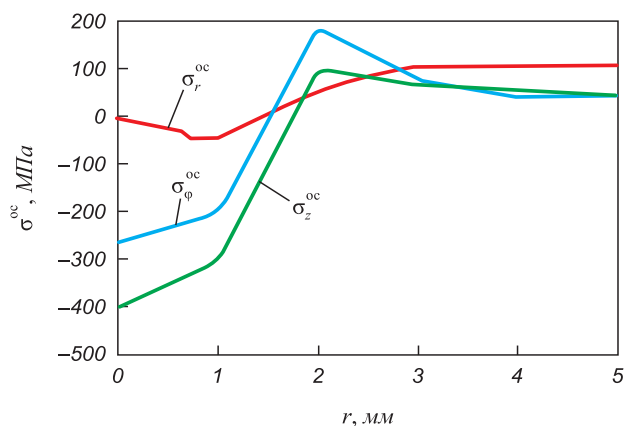


Рис. 2. Распределение компонент остаточных напряжений вдоль радиуса образца

Fig. 2. Distribution of residual stresses components along the sample radius

РЕЗУЛЬТАТЫ МОДЕЛИРОВАНИЯ

На рис. 2 приведены компоненты остаточных напряжений вдоль радиуса образца при орбитальном поверх-

ние угла наклона и глубины внедрения рабочего инструмента на интенсивность напряжений. Следует отметить, что существует оптимальное значение угла наклона рабочего инструмента, при котором обеспечивается формирование максимальных временных и остаточных напряжений. В данном случае, с увеличением угла наклона рабочего инструмента от 0 до 60°, максимальные временные и остаточные напряжения сначала возрастают, затем проходят через максимумы ($\alpha = 45^\circ$) и уменьшаются до определенного значения.

С увеличением величины натяга растет интенсивность временных и остаточных напряжений. При величине натяга свыше 0,175 мм происходит перенаклеп, который отрицательно сказывается на качестве и эксплуатационных свойствах деталей машин.

Влияние продольной подачи рабочего инструмента ($S_{пр}$) и частоты вращения заготовки (n_3). На рис. 4 представлено влияние продольной подачи рабочего инструмента и частоты вращения заготовки при орбитальном поверхностном деформировании на интенсивность напряжений.

Результаты моделирования показали, что временные напряжения изменяются незначительно при подаче рабочего инструмента в диапазоне от 0,1 до 0,2 мм, а при больших значениях подачи временные напряжения снижаются более интенсивно. Подача рабочего инстру-

мента при используемых режимах обработки (в данном случае 0,15 – 0,40 мм) практически не влияет на уровень остаточных напряжений. Уменьшение подачи ($S_{пр} < 0,15$ мм) приводит к местному увеличению деформации обкатываемой поверхности и, следовательно, остаточные напряжения увеличиваются.

Анализ результатов моделирования показал, что при орбитальном поверхностном деформировании частота вращения заготовки существенно влияет на интенсивность максимальных временных и остаточных напряжений. Повышение скорости деформации приводит к увеличению сопротивления металлов деформированию, что объясняется возрастанием скорости перемещений дислокаций, вызывающим, в свою очередь, увеличение сопротивления кристаллической решетки этому перемещению.

Влияние марки материалов. Механические характеристики материала влияют на напряженно-деформированное состояние в очаге деформации и на процессы разгрузки при выходе инструмента, а, следовательно, и на остаточные напряжения упрочненных изделий.

Как видно из таблицы, при постоянных режимах упрочнения, чем больше предел текучести, тем большую величину имеет интенсивность напряжений при орбитальном поверхностном деформировании. При

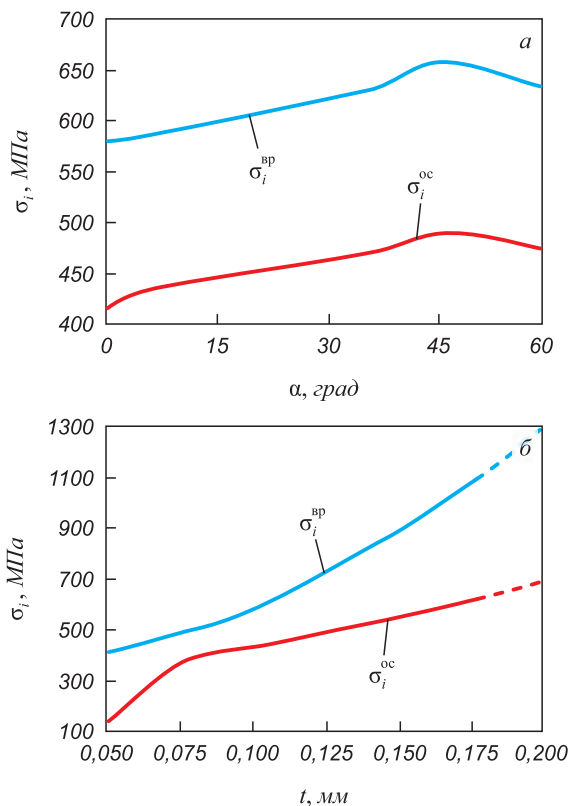


Рис. 3. Зависимость интенсивности максимальных напряжений от угла наклона (а) и глубины внедрения рабочего инструмента (б)

Fig. 3. Dependence of maximum stresses intensity on the angle of inclination (a) and depth of the working tool penetration (b)

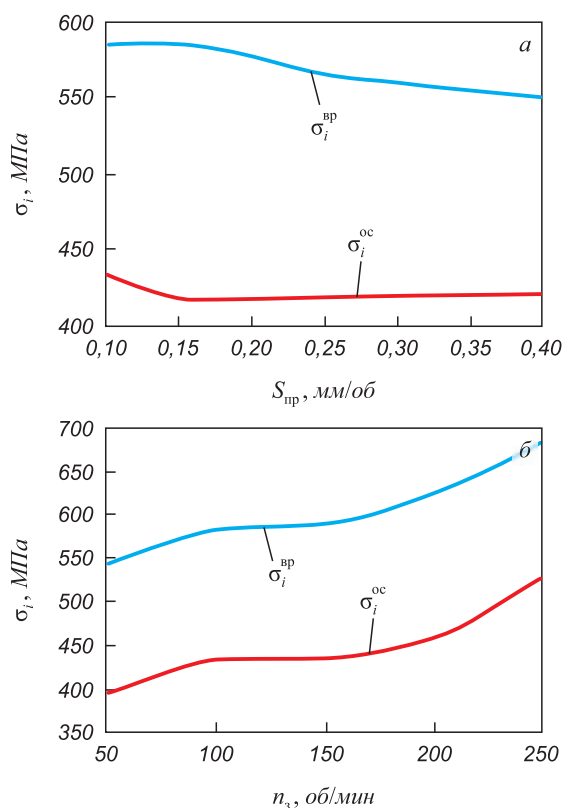


Рис. 4. Зависимость интенсивности максимальных напряжений от продольной подачи рабочего инструмента (а) и частоты вращения заготовки (б)

Fig. 4. Dependence of the maximum stresses intensity on longitudinal supply of the working tool (a) and the workpiece rotation frequency (b)

**Интенсивность максимальных напряжений
в зависимости от марки материалов**

**Intensity of maximum stresses depending
on the grade of materials**

Материал	Интенсивность максимальных напряжений	
	$\sigma_i^{вр}$	$\sigma_i^{ос}$
Магнийевый сплав МА12 ($E = 45$ ГПа, $\sigma_T = 193$ МПа)	297	149
Алюминиевый сплав АМг6Н ($E = 71$ ГПа, $\sigma_T = 280$ МПа)	355	205
Титановый сплав ВТ6 ($E = 96$ ГПа, $\sigma_T = 930$ МПа)	1096	476
Нержавеющая сталь 08Х18Н10 ($E = 193$ ГПа, $\sigma_T = 210$ МПа)	524	338
Конструкционная сталь 20 ($E = 200$ ГПа, $\sigma_T = 250$ МПа)	542	366
Медный сплав Л90 ($E = 110$ ГПа, $\sigma_T = 280$ МПа)	392	281

одинаковом пределе текучести $\sigma_T = 280$ МПа (алюминиевый и медный сплавы) большие напряжения возникают у материала с более высоким модулем упругости.

Выводы

На основе компьютерного моделирования разработана конечно-элементная модель орбитального поверхностного деформирования для определения напряженного состояния в очаге деформации и остаточных напряжений в поверхностном слое детали в зависимости от основных параметров упрочнения. Полученные результаты исследования достаточно хорошо согласуются с физическими закономерностями образования остаточных напряжений при упругопластическом деформировании.

При орбитальном поверхностном деформировании максимальные временные напряжения больше на 15 %, а остаточные напряжения сжатия, которые формируются в поверхностных слоях, больше на 20 % по сравнению с традиционной обкаткой шаром.

Интенсивность максимальных временных и остаточных напряжений зависит от угла наклона рабочего инструмента и достигает максимума при $\alpha = 45^\circ$. Увеличение величины натяга и частоты вращения заготовки приводит к росту интенсивности напряжений и наоборот, при увеличении подачи рабочего инструмента интенсивность напряжений снижается.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Зайдес С.А. Охватывающее поверхностное пластическое деформирование. – Иркутск: Изд-во ИрГТУ, 2001. – 309 с.
2. Шефтель Н.И. Улучшение качества и сортамента проката. – М.: Металлургия, 1973. – 343 с.

3. Вишняков Я.Д., Пискарев В.Д. Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах. – М.: Металлургия, 1989. – 253 с.
4. Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. – М.: Машиностроение, 1987. – 152 с.
5. Totten G., Howes M., Inoue T. Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel. – USA: ASM International, Materials Park, Ohio, 2002. – 500 p.
6. Handbook of Residual Stress and Distortion of Steel / G. Totten, M. Howes, T. Inoue. Publications for ASTM (The American Society for Testing and Materials), 2002. – 449 p.
7. Ebert L.J. The role of residual stresses in the mechanical performance of case carburized steel // Metal Transactions A. 1978. Vol. 9A. P. 1537 – 1551.
8. 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.
9. Скороходов А.Н., Зудов Е.Г., Киричков А.А., Петренко Ю.П. Остаточные напряжения в профилях и способы их снижения. – М.: Металлургия, 1985. – 185 с.
10. Одинцов Л.Г. Упрочнение и отделка деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник. – М.: Машиностроение, 1987. – 328 с.
11. Dimarogonas A.D. Dynamic instability of shafts during machining // Journal of Sound and Vibration. 1986. Vol. 108. No. 2. P. 181 – 189.
12. Kramer I.R. Effect of surfaces on mechanical behavior of metals // Surface Phenomena. Bonis L.J., Bruyn P.L., Duga J.J. eds. Springer US, 1995. P. 171 – 193.
13. Bussu G., Irving P.E. The role of residual stress and heat affected zone properties on fatigue crack propagation in friction stir welded 2024-T351 aluminium joints // Int. Journal of Fatigue. 2003. Vol. 25. No. 1. P. 77 – 88.
14. Блюменштейн В.Ю., Кречетов А.А., Махалов М.С. Современные конкурентоспособные технологии отделочно-упрочняющей обработки поверхностным пластическим деформированием // Упрочняющие технологии и покрытия. 2012. № 7. С. 7 – 12.
15. Лебедев В.А. Эффективные технологии поверхностного пластического деформирования и комбинированной обработки / Под ред. А.В. Киричек. – М.: Издательский дом «Спектр», 2014. – 403 с.
16. 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.
17. Зайдес С.А., Нгуен Ван Хуан. Определение остаточных напряжений в калиброванных прутках // Изв. вуз. Черная металлургия. 2017. Т. 60. № 2. Р. 109 – 115.
18. Технология и инструменты отделочно-упрочняющей обработки деталей поверхностным пластическим деформированием: Справочник: в 2-х томах. Т. 1 / Под общ. ред. А.Г. Суслова. – М.: Машиностроение, 2014. – 480 с.
19. Блюменштейн В.Ю., Махалов М.С. Влияние режимов на формирование остаточных напряжений в поверхностном слое при размерном совмещенном обкатывании // Обработка металлов. 2008. № 2. С. 15 – 22.
20. Hauk V. Structural and Residual Stress Analysis by Nondestructive Methods: Evaluation, Application, Assessment. – Amsterdam: Elsevier Science B.V. 1997. – 640 p.
21. Пат. 2019105314 RU. Способ поверхностного пластического деформирования / Зайдес С.А., Фам Ван Ань; заявл. 26.02.2019; опубл. 29.11.2019.
22. Баков К.А. ANSYS. Справочник пользователя. – М.: ДМК Пресс, 2005. – 640 с.
23. Бруйка В.А., Фокин В.Г., Кураева Я.В. Инженерный анализ в ANSYS Workbench. – Самара: Самарский гос. техн. ун-т, 2013. – 109 с.

Поступила в редакцию 10 января 2020 г.
После доработки 30 января 2020 г.
Принята к публикации 16 октября 2020 г.

QUALITY IMPROVEMENT OF CALIBRATED STEEL BY SURFACE DEFORMATION. PART 1. DETERMINATION OF THE STRESSED STATE OF CYLINDRICAL PARTS DURING ORBITAL SURFACE DEFORMATION

S.A. Zaides, Pham Van Anh

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. Cold drawn calibrated steel is an effective blank for the manufacture of low-rigid cylindrical parts such as shafts and axles. High accuracy of the diametric size along the length of the workpiece, low surface roughness, increased hardness and strength of the surface layer compared to hot rolled products allow us to produce a variety of parts with high metal utilization and high machining performance. The main disadvantage of calibrated metal is the residual stresses that occur during pressure treatment. To reduce or change the nature of the distribution over the cross section, it is proposed to use small plastic deformations in the surface layer of the hire. Known in practice methods of surface plastic deformation (PPD) usually lead to the curvature of non-rigid workpieces. To intensify the stress-strain state in the deformation zone, we propose a method of orbital surface deformation. Based on the finite element modeling, influence of the main parameters of orbital surface deformation on stress state in the deformation zone and residual stresses in the finished products is considered. Compared with the traditional PPD process, the stress intensity during orbital surface deformation will increase by 10 – 15 %. The residual compressive stresses that form in the surface layers reach 70 – 85 % of the material tensile strength. In the second part of the article, it is supposed to provide information on a more effective method of surface deformation and on the change in initial residual stresses that are formed during the calibration of cylindrical rods.

Keywords: calibrated steel, non-rigid cylindrical parts, surface layer, stress intensity, residual stresses, stress state, orbital surface deformation, working tool kinematics, finite element modeling.

DOI: 10.17073/0368-0797-2020-10-802-807

REFERENCES

1. Zaides S.A. *Okhvatyvyayushchee poverkhnostnoe plasticheskoe deformirovanie* [Encompassing Surface Plastic Deformation]. Irkutsk: Izd-vo IrGTU, 2001, 309 p.
2. Sheftel' N.I. *Uluchshenie kachestva i sortamenta prokata* [Improving the Quality and Range of Products]. Moscow: Metallurgiya, 1973, 343 p. (In Russ.).
3. Vishnyakov Y.D., Piskarev V.D. *Upravlenie ostatochnymi napryazheniyami v metallakh i splavakh* [Management of Residual Stresses in Metals and Alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1989, 253 p. (In Russ.).
4. Papshev D.D. *Otdelochno-uprochnyayushchaya obrabotka poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem* [Finishing and Hardening Treatment by Surface Plastic Deformation]. Moscow: Mashinostroenie, 1987, 152 p. (In Russ.).
5. Totten G., Howes M., Inoue T. *Handbook of Residual Stress and Deformation of Steel*. USA: ASM International, Materials Park, Ohio, 2002, 500 p.
6. *Handbook of Residual Stress and Distortion of Steel*. Totten G., Howes M., Inoue T. eds. Publications for ASTM (The American Society for Testing and Materials), 2002, 449 p.
7. Ebert L.J. The role of residual stresses in the mechanical performance of case carburized steel. *Metal Transactions A*. 1978, vol. 9A, pp. 1537–1551.
8. 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.
9. Skorokhodov A.N., Zudov E.G., Kirichkov A.A., Petrenko Yu.P. *Ostatochnye napryazheniya v profilyakh i sposoby ikh snizheniya*

[Residual Stresses in the Profiles and Ways to Reduce Them]. Moscow: Metallurgiya, 1985, 185 p. (In Russ.).

10. Odintsov L.G. *Uprochnenie i otdelka detalei poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem: spravochnik* [Hardening and Finishing of Parts by Surface Plastic Deformation: a Guide]. Moscow: Mashinostroenie, 1987, 328 p. (In Russ.).
11. Dimarogonas A.D. Dynamic instability of shafts during machining. *Journal of Sound and Vibration*. 1986, vol. 108, no. 2, pp. 181–189.
12. Kramer I.R. Effect of surfaces on mechanical behavior of metals. In: *Surface Phenomena*. Bonis L.J., Bruyn P.L., Duga J.J. eds. Springer US, 1995, pp. 171–193.
13. Bussu G., Irving P.E. The role of residual stress and heat affected zone properties on fatigue crack propagation in friction stir welded 2024-T351 aluminium joints. *Int. Journal of Fatigue*. 2003, vol. 25, no. 1, pp. 77–88.
14. Blyumenshtein V.Yu., Krechetov A.A., Makhalov M.S. Modern competitive technologies for finishing and hardening processing by surface plastic deformation. *Uprochnyayushchie technologii i pokrytiya*. 2012, no. 7, pp. 7–12. (In Russ.).
15. Lebedev V.A. *Effektivnye technologii poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya i kombinirovannoi obrabotki* [Effective Technologies of Surface Plastic Deformation and Combined Processing]. Kirichkov A.V. ed. Moscow: ID "Spectr", 2014, 403 p. (In Russ.).
16. Zaides S.A. New methods of surface plastic deformation in the manufacture of machine parts. *Vestnik Magnitogorskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. G.I. Nosova*. 2018, vol. 16, no. 3, pp. 129–139. (In Russ.).
17. Zaides S.A., Nguyen Van Huan. Determination of residual stresses in the calibrated roll. *Izvestiya. Ferrous Metallurgy*. 2017, vol. 60, no. 2, pp. 109–115. (In Russ.).
18. *Tekhnologiya i instrumenty otdelochno-uprochnyayushchei obrabotki detalei poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem: spravochnik: v 2-kh tomakh. T. 1* [Technology and Tools for Finishing and Hardening of Parts by Surface-Plastic Deformation: a Reference Book in 2 Vols. Vol. 1]. Suslov A.G. ed. Moscow: Mashinostroenie, 2014, 480 p. (In Russ.).
19. Blyumenshtein V.Yu., Makhalov M.S. Influence of the modes on formation of residual stresses in surface layer during dimensional combined rolling. *Obrabotka metallov*. 2008, no. 2, pp. 15–22. (In Russ.).
20. Hauk V. *Structural and Residual Stress Analysis by Nondestructive Methods: Evaluation, Application, Assessment*. Amsterdam: Elsevier Science B.V. 1997, 640 p.
21. Zaides S.A., Pham Van Anh. *Sposob poverkhnostnogo plasticheskogo deformirovaniya* [The method of surface plastic deformation]. Patent RF no. 2019105314, publ. 29.11.2019. (In Russ.).
22. Bakov K.A. *ANSYS. Spravochnik pol'zovatelya* [ANSYS. User Reference]. Moscow: DMK Press, 2005, 640 p. (In Russ.).
23. Bruyaka V.A., Fokin V.G., Kuraeva Y.V. *Inzhenernyi analiz v ANSYS Workbench* [Engineering Analysis at ANSYS Workbench]. Samara: Samar. gos. tekhn. un-t, 2013, 109 p. (In Russ.).

Information about the authors:

S.A. Zaides, Dr. Sci. (Eng.), Professor, Head of the Chair "Engineering Technology and Materials" (zsa@istu.edu)

Pham Van Anh, Postgraduate of the Chair "Engineering Technology and Materials" (vananhtd0202@gmail.com)

Received January 10, 2020

Revised January 30, 2020

Accepted October 16, 2020