

УДК: 621.174.22

ВЛИЯНИЕ ПАРАМЕТРОВ ПРОЦЕССА КАЛИБРОВКИ НА ИЗГИБНУЮ ЖЕСТКОСТЬ СТАЛЬНЫХ ПРУТКОВ. ЧАСТЬ 1. ОПРЕДЕЛЕНИЕ ОСТАТОЧНЫХ НАПРЯЖЕНИЙ В КАЛИБРОВАННЫХ ПРУТКАХ

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

Нгуен Ван Хуан, аспирант (nguyenvanhuan.istu@gmail.com)

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

Аннотация. Калиброванный металл представлен как эффективный вид заготовок для ряда металлообрабатывающих технологий. Более широкому его использованию в промышленности препятствуют остаточные напряжения, формирующиеся в процессе холодного деформирования. Так, основной проблемой при изготовлении из калиброванного металла маложестких деталей типа валов является наличие в материале значительного уровня и неравномерного распределения остаточных напряжений, появление которых в значительной мере обусловлено технологическими причинами. Главные компоненты тензора остаточных напряжений в калиброванных прутках определены по методу обтачивания и растачивания одного цилиндра. Для выявления влияния основных параметров процесса калибровки на остаточное напряженное состояние использована методика математического планирования многофакторных экспериментов, на основе которой выявлены основные параметры процесса калибровки, влияющие на формирование технологических остаточных напряжений. Установлено влияние степени относительного обжатия, угла рабочего конуса и длины калибрующей зоны рабочего инструмента на величину и характер распределения осевых, тангенциальных и радиальных остаточных напряжений. Установлено, например, что наибольшую величину растягивающие тангенциальные напряжения имеют при степени относительного обжатия 23 %, рабочем угле волоки 18°, скорости калибровки 2,5 мм/с и наихудших условиях смазки. Следует отметить неоднозначную зависимость компонентов остаточных напряжений от параметров процесса. Так, при увеличении степени относительного обжатия тангенциальные остаточные напряжения возрастают, а осевые снижаются. С увеличением обжатия от 5 до 34 % тангенциальные остаточные напряжения возрастают в 2,5 раза, а осевые уменьшаются на 13 %. Установлено также, что на осевые напряжения большее влияние оказывает угол рабочего конуса волоки, а на тангенциальные – степень относительного обжатия. В диапазоне углов рабочего конуса волоки от 8 до 24° характер остаточных напряжений по сечению прутка не изменяется. С увеличением длины калибрующей зоны волоки значения компонент тензора остаточных напряжений существенно снижаются. Увеличение длины калибрующей зоны является эффективным средством для снижения остаточных напряжений в калиброванных прутках. Глубина распространения остаточных напряжений растяжения не является величиной постоянной и зависит от режимов калибровки.

Ключевые слова: калиброванный металл, остаточные напряжения, параметры калибровки, обжатие, угол рабочего конуса, длина калибрующей зоны.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-11-870-876

Калиброванный металл, получаемый холодным волочением или калибровкой, находит все большее применение и, особенно, в отраслях крупносерийного производства деталей. Так, в последние годы интенсивное развитие получили предприятия автомобилестроения. Широкое использование станков-автоматов, поточных линий, робототехнических систем основано на применении точных заготовок, к которым относится и калиброванный металл. Калиброванные прутки обладают стабильностью диаметрального размера по длине заготовки, хорошо обрабатываются резанием, так как при механической обработке образуется легко ломающаяся стружка [1]. Калиброванный металл также эффективно используют для изготовления длинномерных цилиндрических деталей типа валов и осей [2, 3].

Основной проблемой при изготовлении маложестких деталей типа валов является наличие в материале

значительного уровня и неравномерного распределения остаточных напряжений [2 – 4], появление которых в значительной мере обусловлено технологическими причинами. Остаточные напряжения возникают практически при всех процессах обработки деталей. В отличие от временных напряжений, остаточное напряжение сохраняется во времени.

Исследованиями многих отечественных и зарубежных ученых было доказано существенное влияние остаточных напряжений на условия эксплуатации и срок службы деталей [5 – 10]: износостойкость, коррозионную стойкость, разрушение, статическую прочность, циклическую прочность, стабильность формы деталей, ударные нагрузки. Обычно наличие в деталях остаточных напряжений считают отрицательным фактором, но в некоторых случаях такие напряжения могут быть полезными [11, 12] (повышают предел упругости систе-

мы, предел выносливости, коррозионно-механическую и коррозионную стойкость и т. п.).

В настоящее время предложена достаточно широкая гамма способов определения остаточных напряжений [13 – 17]. Однако большинство из них позволяет определять либо качественную картину распределения остаточных напряжений, либо выявлять напряжения в тонком поверхностном слое [18 – 20]. Для технологических процессов механической обработки резанием или поверхностного пластического деформирования, при которых остаточные напряжения формируются в основном в поверхностных слоях, вполне оправданы, например, рентгеновские методы измерения [21]. Если же остаточные напряжения распределены по всему объему тела, то физические методы пока не позволяют решить поставленную задачу.

В первой части работы рассматривается влияние основных параметров процесса калибровки на остаточное объемное напряженное состояние, а во второй части будет рассмотрено влияние остаточных напряжений на изгибную жесткость калиброванных прутков.

Определение основных параметров калибровки, влияющих на формирование остаточных напряжений. Главные компоненты тензора остаточных напряжений в калиброванных прутках определены по методу обтачивания и растачивания одного цилиндра [2, 3, 13]. Для выявления влияния основных параметров процесса калибровки на остаточное напряженное состояние использована методика планирования многофакторных экспериментов [22, 23]. Для учета одновременного влияния на остаточные напряжения величины относительного обжатия, угла рабочего конуса волокна, скорости калибровки, качества смазки был спланирован и реализован дробный четырехфакторный эксперимент [2]. Параметры процесса: X_1 – степень относительного обжатия (Q), %; X_2 – угол конуса рабочей зоны волокна (2α), град; X_3 – скорость калибровки (V), мм/с; X_4 – качество смазки, оцениваемое по величине коэффициента трения (f), который определен на основании экспериментальных данных [2]. Исследуемый материал сталь 35, диаметр прутков 36 мм.

Значения этих факторов на нулевом, верхнем и нижнем уровнях, а также интервалы варьирования приве-

дены в [таблице](#). Разные значения коэффициентов трения были получены за счет применения калибровки без смазки ($f = 0,13$) и различных смазок: сухой порошок натриевого мыла ($f = 0,06$), масло индустриальное 30 ($f = 0,095$).

В соответствии с матрицей планирования [2] проведено восемь основных опытов (определяющий контраст $X_1X_2X_3X_4 = 1$) и три дополнительных на нулевом уровне для определения дисперсии ошибки эксперимента.

При оценке остаточного напряженного состояния рассматривали максимальные растягивающие тангенциальные $\sigma_{\phi_{max}}$ и осевые напряжения $\sigma_{z_{max}}$, т. е. параметр «оптимизации» характеризовал наименее благоприятные с этой точки зрения условия процесса. Параметрами $\sigma_{z_{max}}$ и $\sigma_{\phi_{max}}$ удобно пользоваться при оценке работоспособности изделий, для которых заранее известна схема напряженного состояния.

Опыты выявили существенное влияние параметров процесса калибровки на остаточные напряжения, которые изменяются не только по величине, но и по знаку. В некоторых случаях напряжения достигают 320 МПа и более (в зависимости от параметров калибровки). Установлено, например, что наибольшие значения растягивающие тангенциальные напряжения имеют при степени относительного обжатия 23 %, рабочем угле волокна 18°, скорости калибровки 2,5 мм/с и наихудших условиях смазки.

При оценке остаточных напряжений по максимальным значениям растягивающих осевых и тангенциальных остаточных напряжений получены следующие уравнения регрессии:

$$(\sigma_z)_{max} = 269,4 - 21,9X_1 + 34,4X_2 + 0,6X_3 + 9,4X_4; \quad (1)$$

$$(\sigma_{\phi})_{max} = 216,0 + 65,6X_1 + 24,3X_2 + 4,3X_3 + 4,4X_4. \quad (2)$$

Следует отметить неоднозначную зависимость компонентов остаточных напряжений от параметров процесса. Так, при увеличении обжатия $\sigma_{\phi_{max}}$ возрастают, а $\sigma_{z_{max}}$ снижаются. Установлено также, что на осевые напряжения большее влияние оказывает угол рабочего конуса волокна, а на тангенциальные – степень относительного обжатия.

Значения факторов на нулевом, верхнем и нижнем уровнях, интервалы варьирования

Values of factors at the zero, top and bottom levels, variation intervals

Показатель	Относительное обжатие, $Q(X_1)$, %	Угол конуса рабочей зоны волокна, $2\alpha(X_2)$, град	Скорость калибровки, $V(X_3)$, мм/с	Коэффициент трения, $f(X_4)$
Интервал варьирования	±9	±6	±1,23	±0,035
Основной уровень	14	12	1,26	0,095
Верхний уровень	23	18	2,50	0,130
Нижний уровень	5	6	0,03	0,060

Постановка однофакторных экспериментов. Рассмотрим влияние основных параметров процесса калибровки на остаточное напряженное состояние. Математическое планирование экспериментов позволило выявить три основных параметра процесса: степень относительного обжатия Q (5 – 34 %), угол рабочего конуса инструмента 2α (8 – 24°) и длина калибрующей зоны l_k (0,1 – 15 мм).

Качество смазки в данном случае учитывать не будем, так как в реальных производственных процессах стремятся использовать качественную технологическую смазку для снижения энергетических затрат и повышения качества поверхностного слоя калиброванного металла. Скорость калибровки, судя по коэффициентам уравнений регрессии, оказывает незначительное влияние на формирование остаточных напряжений при холодном деформировании, поэтому в дальнейших опытах она тоже не рассматривалась.

Степень относительного обжатия. Величина обжатия прутков при калибровке оказывает существенное влияние не только на качество поверхности и механические свойства металла, но и на остаточные напряжения. Однако о влиянии этого фактора имеются противоречивые данные [2, 3].

Величину обжатия в опытах изменяли от 5 до 34 %. Скорость калибровки составляла 2 мм/с, угол рабочего конуса волокна $2\alpha = 20^\circ$. С увеличением степени относительного обжатия максимальные осевые остаточные напряжения снижаются, а тангенциальные возрастают (рис. 1).

С увеличением обжатия от 5 до 34 % тангенциальные остаточные напряжения возрастают в 2,5 раза, а осевые уменьшаются на 13 %, т. е. необходимо подчеркнуть,

что величина обжатия влияет в большей мере на тангенциальные остаточные напряжения, чем на осевые. Получено, что при $Q = 20\%$, $\sigma_{z_{\max}} = \sigma_{\varphi_{\max}} = 270$ МПа.

Угол конуса рабочей зоны волокна. Влияние угла конуса исследовали в интервалах от 4 до 45° при различных обжатиях.

Опыты показали (рис. 2), что в диапазоне углов рабочего конуса волокна от 8 до 24° характер остаточных напряжений по сечению прутка не изменяется. Общий уровень напряжений находится в прямой зависимости от величины угла рабочего конуса инструмента. Это согласуется с результатами работ ряда авторов [24, 25]. Так, например, при калибровке с обжатием 4 % через волоку с углом $2\alpha = 24^\circ$ максимальные осевые напряжения достигают 350 МПа, а при $2\alpha = 8^\circ$ – 250 МПа.

Аналогичное изменение наблюдается и при другом обжатии [2]. При этом установлено, что угол рабочего конуса волокна большее влияние оказывает на осевые остаточные напряжения, чем на тангенциальные. Так, при изменении 2α от 8 до 24° (см. рис. 2) $\sigma_{z_{\max}}$ возрастает в 2,3 раза, а $\sigma_{\varphi_{\max}}$ – в 1,16 раза. Увеличение угла рабочего конуса волокна от 24 до 45° приводит к незначительному повышению остаточных напряжений [26]. При уменьшении угла рабочего конуса волокна до 4° закономерность распределения осевых остаточных напряжений сохраняется, а тангенциальных резко изменяется.

Длина калибрующей зоны. Используя метод планирования экспериментов, определено влияние длины калибрующей зоны инструмента на изменение остаточных напряжений в прутках [2]. Через X_1 обозначена величина обжатия Q , %, а через X_2 – длина калибрующей зоны l_k , мм.

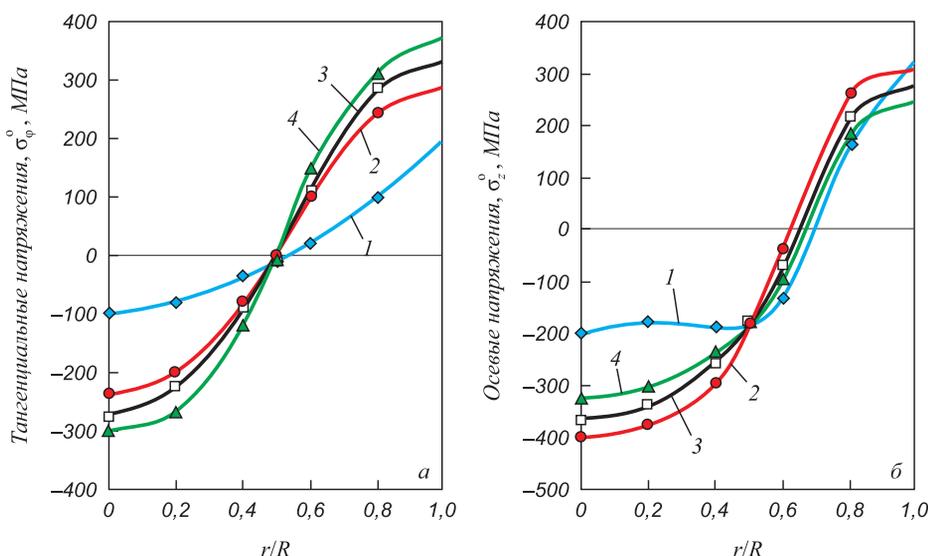


Рис. 1. Кривые распределения тангенциальных σ_φ^0 и осевых σ_z^0 остаточных напряжений по сечению калиброванного прутка в зависимости от степени обжатия при Q , %:
1 – 5; 2 – 15; 3 – 25; 4 – 34

Fig. 1. Distribution curves of tangential σ_φ^0 and axial σ_z^0 residual stresses on cross-section of the calibrated rod depending on cobbing at Q , %:
1 – 5; 2 – 15; 3 – 25; 4 – 34

Для статистической обработки результатов проведено семь опытов, из которых три – на нулевом уровне. В качестве отклика приняли максимальные значения осевых и тангенциальных остаточных напряжений растяжения.

Как видно из полученных результатов (рис. 3), с увеличением длины калибрующей зоны значения компонент тензора остаточных напряжений снижаются. Например, при увеличении l_k с 0,5 до 20,5 мм ($Q = 23\%$) $\sigma_{z_{\max}}$ уменьшается с 320 до 160 МПа, а $\sigma_{\varphi_{\max}}$ – с 380 до

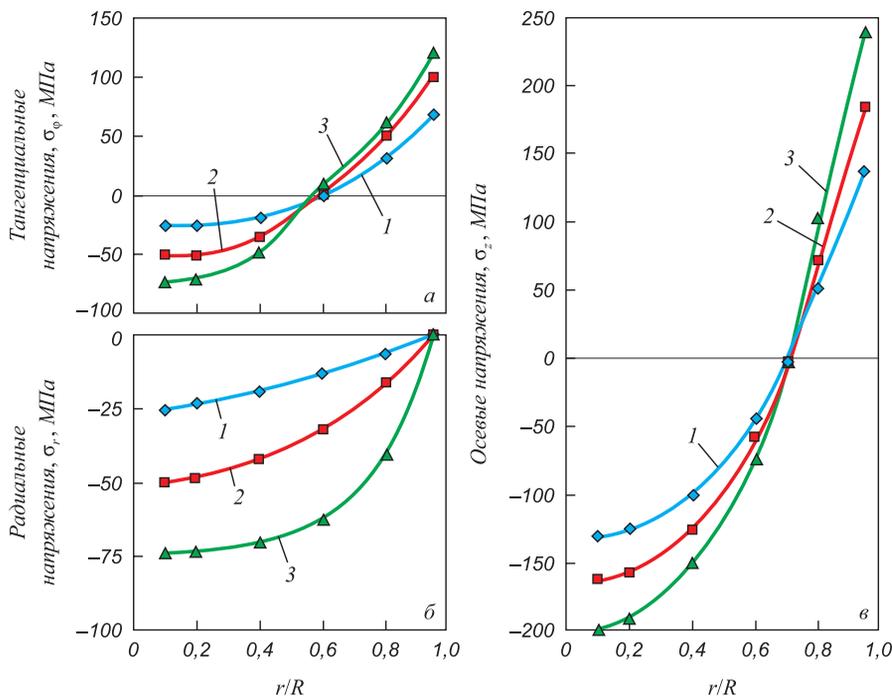


Рис. 2. Кривые распределения тангенциальных, осевых радиальных остаточных напряжений в зависимости от угла рабочего конуса волоки ($Q = 4\%$) при 2α , град:
1 – 8; 2 – 12; 3 – 24

Fig. 2. Distribution curves of tangential, axial radial residual stresses depending on angle of a working cone of drawing die ($Q = 4\%$) at 2α , grad:
1 – 8; 2 – 12; 3 – 24

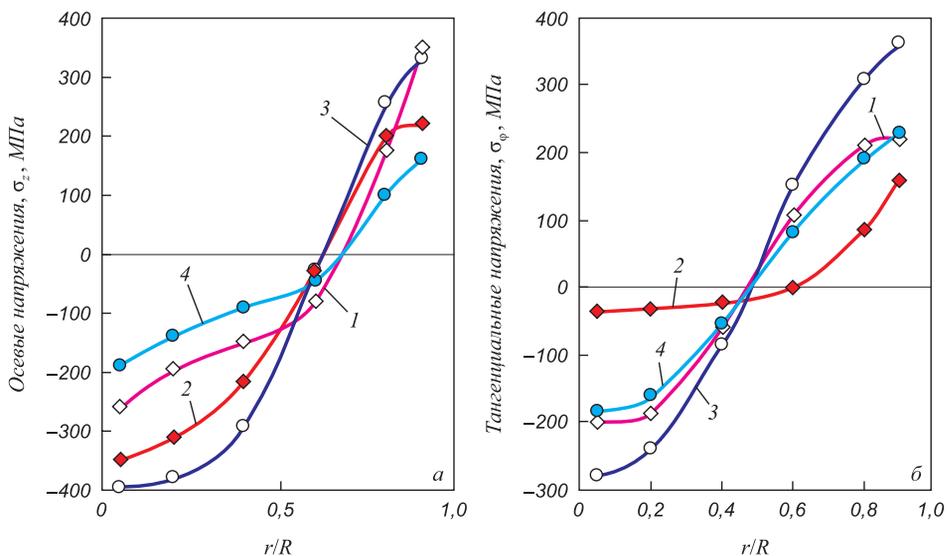


Рис. 3. Кривые распределения тангенциальных и осевых остаточных напряжений в зависимости от степени относительного обжатия и длины калибрующей зоны волоки ($2\alpha = 24^\circ$) при:
1 – $Q = 6\%$, $l_k = 0,5$ мм; 2 – $Q = 6\%$, $l_k = 20,5$ мм; 3 – $Q = 23\%$, $l_k = 0,5$ мм; 4 – $Q = 23\%$, $l_k = 20,5$ мм

Fig. 3. Distribution curves of tangential and axial residual stresses depending on extent of the relative cobbing and length of the calibrating zone ($2\alpha = 24^\circ$):
1 – $Q = 6\%$, $l_k = 0.5$ mm; 2 – $Q = 6\%$, $l_k = 20.5$ mm; 3 – $Q = 23\%$, $l_k = 0.5$ mm; 4 – $Q = 23\%$, $l_k = 20.5$ mm

240 МПа, т. е. осевые остаточные напряжения растяжения снижаются на 50 %, а тангенциальные на 37 %. Аналогично изменяются остаточные напряжения и при калибровке с обжатием 6 %. После обработки данных опытов получены следующие уравнения регрессии для максимальных значений принятых параметров оптимизации:

$$\sigma_{z_{\max}} = 245 - 0,5X_1 - 5,5X_2 - 25X_1X_2; \quad (3)$$

$$\sigma_{\varphi_{\max}} = 257,5 + 57,5X_1 - 52,5X_2 - 12,5X_1X_2. \quad (4)$$

Знак и величина коэффициентов в уравнениях (3), (4) четко отражают влияние длины калибрующей зоны и еще раз подтверждают ранее полученные данные о влиянии степени обжатия на остаточные напряжения. Результаты опытов, проведенных в производственных условиях, полностью согласуются с лабораторными испытаниями по влиянию длины калибрующей зоны на остаточные напряжения. Так, при $l_k/d = 0,08$, $\sigma_{z_{\max}} = 360$ МПа, а при $l_k/d = 0,49$, $\sigma_{z_{\max}} = 145$ МПа [2]. Таким образом, увеличение длины калибрующей зоны является эффективным средством для снижения остаточных напряжений в калиброванных прутках.

Выводы. С использованием методики математического планирования экспериментов установлено влияние основных параметров процесса калибровки на формирование остаточных напряжений. Такими являются: степень относительного обжатия, угол рабочего конуса и длина калибрующей зоны рабочего инструмента.

Установлено влияние основных параметров процесса калибровки на величину и характер распределения по сечению цилиндрических прутков осевых, тангенциальных и радиальных остаточных напряжений. Смена знака остаточных напряжений зависит от параметров деформирования и находится на глубине $(0,5 - 0,8)r/R$.

Выявлено, что при режимах калибровки, которые используются на производстве, в периферийных слоях прутков при холодной обработке давлением формируются осевые и тангенциальные остаточные напряжения растяжения, а в центральных слоях – напряжения сжатия. Радиальные остаточные напряжения на поверхности равны нулю, а в остальном объеме тела являются сжимающими.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шефтель Н.И. Улучшение качества и сортамента проката. – М.: Металлургия, 1973. – 343 с.
2. Зайдес С.А. Остаточные напряжения и качество калиброванного металла. – Иркутск: ИрГТУ, 1992. – 200 с.
3. Зайдес С.А. Охватывающее поверхностное пластическое деформирование. – Иркутск: ИрГТУ, 2001. – 309 с.
4. Соколов И.А., Уральский В.И. Остаточные напряжения и качество металлопродукции. – М.: Металлургия, 1981. – 97 с.
5. Поздеев А.А., Няшин Ю.И., Трусов П.В. Остаточные напряжения. Теория и приложения. – М.: Наука, 1982. – 111 с.
6. Вишняков Я.Д., Пискарев В.Д. Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах. – М.: Металлургия, 1989. – 253 с.
7. Остаточные напряжения в профилях и способы их снижения / А.Н. Скороходов, Е.Г. Зудов, А.А. Киричков, Ю.П. Петренко. – М.: Металлургия, 1985. – 185 с.
8. Алексеев П.Г. Устойчивость остаточных напряжений и их влияние на износостойкость деталей, упрочненных наклепом // Повышение эксплуатационных свойств деталей поверхностным пластическим деформированием. – М.: МДНТП, 1971. С. 76 – 79.
9. Радченко В.П., Саушкин М.Н. Ползучесть и релаксация остаточных напряжений в упрочненных конструкциях. – М.: Машиностроение-1, 2005. – 226 с.
10. Стружанов В.В. Об остаточных напряжениях после прокатки и расслоения двухслойных полос // Вестник СамГТУ. Серия физ.-мат. науки. № 5. 2010. С. 55 – 63.
11. Остаточные напряжения / Ж.А. Мрочек, С.С. Макаревич, Л.М. Кожуро и др. / Под ред. С.С. Макаревича. – Минск: УП «Технопринт», 2003. – 316 с.
12. Подзей А.В., Сулима А.М., Евстигнеев М.И. Технологические остаточные напряжения / Под ред. А.В. Подзея. – М.: Машиностроение, 1973. – 216 с.
13. Биргер И.А. Остаточные напряжения. – М.: Машгиз, 1963. – 232 с.
14. Остаточные напряжения в слоистых композитах / Ю.П. Трыков, Е.П. Покатаев, В.Г. Шморгун, А.А. Храпов. – М.: Металлургия, 2010. – 237 с.
15. Недорезов И.В., Поляков А.П., Вологов и др. Методы определения остаточных напряжений в незакаленных рельсах // Производство проката. 2001. № 2. С. 11 – 16.
16. Белоусов Ю.В. Вычисление остаточных напряжений при травлении консолюно закрепленного образца // Строительная механика инженерных конструкций и сооружений. 2017. № 1. С. 78 – 80.
17. Каратушин С.И., Храмова Д.А., Бильдюк Н.А. Моделирование и расчет остаточных напряжений в прокатных профилях // Изв. вуз. Машиностроение. 2017. № 6. С. 28 – 34.
18. 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.
19. Махалов М.С. Расчетная модель формирования остаточных напряжений поверхностного слоя при размерном совмещенном обкатывании // Обработка металлов. 2008. № 4. С. 17 – 18.
20. Радченко В.П., Морозов А.П., Саушкин М.Н. Стохастическая модель для расчета остаточных напряжений в поверхностно упрочненном полом цилиндра в условиях ползучести // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Механика. 2017. № 1. С. 181 – 207.
21. Русаков А.А. Рентгенография металлов. – М.: Атомиздат, 1977. – 237 с.
22. Реброва И.А. Теория планирования эксперимента. – Омск: СибАДИ, 2016. – 106 с.
23. Планирование эксперимента в исследовании технологических процессов / К. Хартман и др. – М.: Мир, 1977. – 552 с.
24. Берин И.Ш., Днестровский Н.З. Волоочильный инструмент. – М.: Металлургия, 1971. – 174 с.
25. Домрачев А.Ф., Зайдес С.А., Квактун В.Б. и др. Освоение повышения скоростей волочения алюминиевой проволоки // Кабельная техника. 1977. № 8. С. 10 – 12.
26. Дружинина Т.Я., Зайдес С.А., Аркулис Г.Э. и др. Остаточные напряжения в калиброванном металле и способы их регулирования // Остаточные напряжения и методы регулирования: Тр. Всесоюз. симпозиум по остаточным напряжениям. – М., 1982. С. 175 – 180.

Поступила 16 августа 2016 г.

INFLUENCE OF PARAMETERS OF THE CALIBRATION PROCESS ON BENDING STIFFNESS OF STEEL ROD. PART 1. DETERMINATION OF RESIDUAL STRESSES IN THE CALIBRATED ROD

S.A. Zaides, *Nguen Van Khuan*

Irkutsk National Research Technical University, Irkutsk, Russia

Abstract. Calibrated metal is presented as an effective form of blanks for a number of metal technologies. Greater its use in industry is prevented by residual stresses formed during cold deformation. So, the main problem at manufacture from the calibrated metal of low-rigid details like shaft, is existence in material of the considerable level and a non-uniform distribution of residual stresses, the appearance of which is large due to technological reasons. The main components of the tensor of residual stresses in a calibrated rod were determined by the method of grinding and boring of one cylinder. The planning methodology of multivariate experiments was used to determine the effect of the main parameters of calibration process on residual stress state, on the basis of which the main parameters of the calibration process that affect the formation of technological residual stresses are revealed. Influence of extent of the relative cobbing, corner of a working cone and length of the calibrating zone of the working tool on the size and the nature of distribution of axial, tangential and radial residual stresses were determined. It was established, for example, that the stretching tangential stresses have the largest value at degree of the relative cobbing of 23 %, working angle of drawing die of 18° and calibration speeds of 2.5 mm/sec under the worst conditions of lubricant. The ambiguous dependence of components of residual stresses on process parameters should be noted. So, at the increase in extent of the relative cobbing, the tangential residual stresses increase and axial ones decrease. With increase in cobbing from 5 to 34 % tangential residual stresses increase by 2.5 times, and axial ones decrease by 13 %. It was established also that on axial tension the greater influence is exerted by an angle of working drawing die, and on tangential – extent of the relative cogging. In the range of angles of working drawing die from 80 to 240 character of residual stresses on the section of a bar does not change. With increase in length of the calibrating zone of the drawing die the values of components of residual stresses tensor significantly decrease. Increase in length of the calibrating zone is an effective remedy for decrease in residual stresses in the calibrated bars. Depth of distribution of compressive residual stresses is not a stationary value and depends on the calibration modes.

Keywords: calibrated metal, residual stresses, calibration parameters, cobbing, angle of working cone, length of calibrating zone.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-11-870-876

REFERENCES

1. Sheftel' N.I. *Uluchshenie kachestva i sortamenta prokata* [Improvement of quality and assortment of rolled products]. Moscow: Metallurgiya, 1973, 343 p. (In Russ.).
2. Zaides S.A. *Ostatochnye napryazheniya i kachestvo kalibrovannogo metalla* [Residual stresses and quality of the calibrated metal]. Irkutsk: IrGTU, 1992, 200 p. (In Russ.).
3. Zaides S.A. *Okhvatyvyayushchee poverkhnostnoe plasticheskoe deformirovanie* [Covering surface plastic deformation]. Irkutsk: IrGTU, 2001, 309 p. (In Russ.).
4. Sokolov I.A., Ural'skii V.I. *Ostatochnye napryazheniya i kachestvo metalloproduktov* [Residual stresses and quality of metal products]. Moscow: Metallurgiya, 1981, 97 p. (In Russ.).
5. Pozdeev A.A., Nyashin Yu.I., Trusov P.V. *Ostatochnye napryazheniya. Teoriya i prilozheniya* [Residual stresses. Theory and applications]. Moscow: Nauka, 1982, 111 p. (In Russ.).
6. Vishnyakov Ya.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.).
7. Skorokhodov A.N., Zudov E.G., Kirichkov A.A., Petrenko Yu.P. *Ostatochnye napryazheniya v profilyakh i sposoby ikh snizheniya* [Residual stresses in profiles and the ways of their decrease]. Moscow: Metallurgiya, 1985, 185 p. (In Russ.).
8. Alekseev P.G. Stability of residual stresses and their influence on wear resistance of hardened parts. In: *Povyshenie ekspluatatsionnykh svoystv detalei poverkhnostnym plasticheskim deformirovaniem* [Increase of operational properties of parts by surface plastic deformation]. Moscow: MDNTP, 1971, pp. 76–79. (In Russ.).
9. Radchenko V.P., Saushkin M.N. *Polzuchest' i relaksatsiya ostatochnykh napryazhenii v uprochnennykh konstruktsiyakh* [Creep and relaxation of residual stresses in hardened structures]. Moscow: Mashinostroenie-1, 2005, 226 p. (In Russ.).
10. Struzhanov V.V. On residual stresses after rolling and stratification of double-layer strips. *Vestnik SamGTU. Seriya fiz-mat nauki*. 2010, no. 5, pp. 55–63. (In Russ.).
11. Mrochek Zh.A., Makarevich S.S., Kozhuro L.M. etc. *Ostatochnye napryazheniya* [Residual stresses]. Makarevich S.S. ed. Minsk: UP "Tekhnoprint", 2003, 316 p. (In Russ.).
12. Podzei A.V., Sulima A.M., Evstigneev M.I. *Tekhnologicheskie ostatochnye napryazheniya* [Technological residual stresses]. Podzei A.V. ed. Moscow: Mashinostroenie, 1973, 216 p. (In Russ.).
13. Birger I.A. *Ostatochnye napryazheniya* [Residual stresses]. Moscow: Mashgiz. 1963, 232 p. (In Russ.).
14. Trykov Yu.P., Pokataev E.P., Shmorgun V.G., Khrapov A.A. *Ostatochnye napryazheniya v sloistykh kompozitakh* [Residual stresses in layered composites]. Moscow: Metallurgizdat, 2010, 237 p. (In Russ.).
15. Nedorezov I.V., Polyakov A.P., Volegov etc. Methods for determining residual stresses in no-tempered rails. *Proizvodstvo prokata*. 2001, no. 2, pp. 11–16. (In Russ.).
16. Belousov Yu.V. Calculation of residual stresses during etching of the fixed sample. *Stroitel'naya mekhanika inzhenernykh konstruktiv i sooruzhenii*. 2017, no. 1, pp. 78–80. (In Russ.).
17. Karatushin S.I., Khramova D.A., Bil'dyuk N.A. Modeling and calculation of residual stresses in rolling profiles. *Izv. vuz. Mashinostroenie*. 2017, no. 6(582), pp. 28–34. (In Russ.).
18. Blyumenshtein V.Yu., Makhalov M.S. Influence of the modes on formation of residual stresses in the surface layer at dimensional combined rolling. *Obrabotka metallov*. 2008, no. 2 (39), pp. 15–22. (In Russ.).
19. Makhalov M.S. Calculated model of formation of residual stresses of the surface layer at dimensional combined rolling. *Obrabotka metallov*. 2008, no. 4, pp. 17–18. (In Russ.).
20. Radchenko V.P., Morozov A.P., Saushkin M.N. Stochastic model for calculating residual stresses in a surface-hardened hollow cylinder under creep conditions. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Mekhanika*. 2017, no. 1, pp. 181–207. (In Russ.).
21. Rusakov A.A. *Rentgenografiya metallov* [Radiography of metals]. Moscow: Atomizdat, 1977, 237 p. (In Russ.).
22. Rebrova I.A. *Teoriya planirovaniya eksperimenta* [Theory of experiment planning]. Omsk: SibADI, 2016, 106 p. (In Russ.).
23. Hartmann K., Lezki E., Schäfer W. *Statistische Versuchplanung und Auswertung in der Stoffwirtschaft*. Klaus Hartmann (Hrsg.). Leipzig: VEB Deutscher Verlag für Grundstoffindustrie, 1974.

- (Russ.ed.: Hartmann K. etc. *Planirovanie eksperimentov v issledovanii tekhnologicheskikh protsessov*. Moscow: Mir, 1977, 552 p.).
24. Berin I.Sh., Dnestrovskii N.Z. *Volochil'nyi instrument* [Drawing tool]. Moscow: 1971, 174 p. (In Russ.).
25. Domrachev A.F., Zaides S.A., Kvaktun V.B. etc. Development of increase in speeds of drawing of an aluminum wire. *Kabel'naya tekhnika*. 1977, no. 8, pp. 10–12. (In Russ.).
26. Druzhinina T.Ya., Zaides S.A., Arkulis G.E. etc. Residual stresses in the calibrated metal and methods of their regulation. In: *Ostatochnye napryazheniya i metody regulirovaniya: Tr. Vsesoyuz. simpoz. po ostatochnym napryazheniyam* [Residual stresses and control methods:

Papers of All-Union Symp. on Residual Stresses]. Moscow: 1982, pp. 175–180. (In Russ.).

Information about the authors:

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

Nguyen Van Khuan, Postgraduate
(nguyenvanhuan.istu@gmail.com)

Received August 16, 2016
