

УДК 621.174.22

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, г. Иркутск, ул. Лермонтова, 83)

Аннотация. Калиброванный металл представлен как эффективный вид заготовок для ряда металлообрабатывающих технологий. Более широко его использованию в промышленности препятствуют остаточные напряжения, формирующиеся в процессе холодного деформирования. Целью настоящего исследования явилось 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. Для выявления влияния основных параметров процесса калибровки на остаточное напряженное состояние использована методика планирования многофакторных экспериментов. Для учета одновременного влияния на остаточные напряжения величины относительного обжатия, угла рабочего конуса волоки, скорости калибровки, качества смазки был спланирован и реализован дробный четырехфакторный эксперимент. Из проведенных опытов выявлено, что параметры процесса калибровки существенно влияют на остаточные напряжения, которые изменяются не только по величине, но и по знаку. Результаты экспериментов показали, что в диапазоне углов волоки от 8 до 24° тангенциальные и осевые остаточные напряжения одновременно увеличивается: возрастают в 2,3 раза, а σ_{max} – в 1,8 раза. С увеличением длины калибрующей зоны максимальные осевые остаточные напряжения растяжения снижаются на 52 %, а тангенциальные увеличиваются на 21 %. 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 происходит на глубине $(0,5 - 0,8)r/R$. Выявлено, что при режимах калибровки, которые используют 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 остаточные напряжения – сжимающие.

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

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-2-109-115

Калиброванный металл, получаемый холодным волочением или калибровкой, находит все большее применение и особенно в отраслях крупносерийного производства деталей [1 – 3]. Исследованиями многих отечественных и зарубежных ученых было доказано существенное влияние остаточных напряжений на условия эксплуатации и срок службы деталей [4 – 18].

Целью настоящего исследования явилось 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 [4, 5]. Для выявления влияния основных параметров процесса калибровки на остаточное напряженное состояние использована методика планирования многофакторных экспериментов [19, 20]. Для учета одновременного влияния на остаточные напряжения величины относительного обжатия, угла рабочего конуса волоки, скорости калибровки, качества смазки был спланирован и реализован дробный четырехфакторный эксперимент [4]. Параметры процесса обозначены: X_1 – степень относительного

обжатия (Q), %; X_2 – угол конуса рабочей зоны волоки (2α), град; X_3 – скорость калибровки мм/с; X_4 – качество смазки, оцениваемое по величине коэффициента трения (f), который определен на основании экспериментальных данных [4]. Исследуемый материал – сталь 35, диаметр прутков 36 мм.

Значения этих факторов на нулевом, верхнем и нижнем уровнях, интервалы варьирования приведены в табл. 1. 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 [4] провели восемь основных опытов (определяющий контраст $X_1 X_2 X_3 X_4 = 1$) и три дополнительных на нулевом уровне для определения дисперсии ошибки эксперимента.

Прутки, калиброванные по заводской технологии, обычно имеют в периферийных слоях растягивающие осевые, тангенциальные остаточные напряжения и сжимающие радиальные, значения которых невелики.

Таблица 1

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

Table 1. Values of the factors at zero, upper and lower levels and varying intervals

Интервал варьирования, уровень	$Q(X_1)$, %	$2a(X_2)$, град	$V(X_3)$, мм/с	$f(X_4)$
Интервал варьирования	± 9	± 6	$\pm 1,23$	$\pm 0,035$
Уровень:				
основной	14	12	1,26	0,095
верхний	23	18	2,50	0,13
нижний	5	6	0,03	0,6

Такая схема напряженного состояния неблагоприятно сказывается на работоспособности многих видов изделий. Поэтому при оценке остаточного напряженного состояния рассматривали максимальные растягивающие тангенциальные ($\sigma_{\varphi_{\max}}$) и осевые ($\sigma_{z_{\max}}$) напряжения, т.е. параметр «оптимизации» характеризовал наименее благоприятные с этой точки зрения условия процесса. Параметрами $\sigma_{z_{\max}}$ и $\sigma_{\varphi_{\max}}$ удобно пользоваться при оценке работоспособности изделий, для которых заранее известна схема напряженного состояния.

Из проведенных опытов выявлено, что параметры процесса калибровки существенно влияют 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 волоки 18°, скорости калибровки 2,5 мм/с и при наихудших условиях смазки.

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

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

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

В формулах (1) и (2) использованы кодированные значения X_i . Переход к натуральным значениям Q_i осуществляется по формуле

$$X_i = \frac{Q_i - Q_{i0}}{\Delta Q}, \quad (3)$$

где Q_{i0} – натуральные значения фактора на основном уровне; ΔQ – натуральные значения интервала варьирования.

Для определения статистической значимости коэффициентов регрессии рассчитывали их доверительный интервал (Δb_i):

$$\Delta b_i = \pm t_{\alpha, N} S b_i, \quad (4)$$

где $t_{\alpha, N}$ – t -критерий Стьюдента; α – уровень значимости, т.е. вероятность практически невозможных событий ($\alpha = 0,05$); $S b_i = \sqrt{S_{b_i}^2}$; здесь $S_{b_i}^2$ – дисперсия, характеризующая ошибку в определении коэффициентов регрессии (вычисляется по результатам опытов на нулевом уровне).

После оценки значимости коэффициентов регрессии проводили проверку гипотезы об адекватности полученного уравнения по критерию Фишера (F -критерия):

$$F_{f_1 f_2}^{\text{расч}} = \frac{S_{\text{ад}}^2}{S_y^2};$$

здесь $f_1 f_2$ – число степеней свободы при определении соответствующих дисперсий; $S_{\text{ад}}^2$ – дисперсия адекватности; S_y^2 – дисперсия при определении среднего значения параметра оптимизации на нулевом уровне.

Адекватность полученных уравнений проверяли также с помощью нуль-гипотезы. Для этого результаты опытов, поставленных на нулевом уровне, сравнивали со свободным членом уравнения регрессии и рассчитывали критерий Стьюдента.

Опыты, проведенные на нулевом уровне (табл. 1), позволили оценить коэффициенты этого уравнения. В уравнениях (1) и (2) доверительный интервал коэффициентов равен соответственно 1,34 и 0,76. Дисперсия адекватности составила 5,18; критерий Фишера – 15,69 при табличном его значении 19,25. Таким образом,

Таблица 2

Матрица планирования и результаты опытов

Table 2. Planning matrix and the results of experiments

Опыт	Фактор					Напряжение, МПа	
	X_0	X_1	X_2	X_3	X_4	$\sigma_{z_{\max}}$	$\sigma_{\varphi_{\max}}$
1	+	–	–	–	–	235	180
2	+	+	+	–	–	230	295
3	+	+	–	+	–	380	480
4	+	+	–	–	+	230	280
5	+	–	+	+	–	400	170
6	+	–	+	–	+	390	180
7	+	–	–	+	+	205	125
8	+	+	+	+	+	300	350
9	0	0	0	0	0	310	210
10	0	0	0	0	0	310	230
11	0	0	0	0	0	300	220

уравнения (1) и (2) адекватны и их можно использовать для поиска направления к оптимуму.

Следует отметить неоднозначную зависимость компонентов остаточных напряжений от параметров процесса. Так, при увеличении обжатия значения $\sigma_{\varphi_{\max}}$ 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.

Методика замеров и расчетов остаточных напряжений состояла в следующем. Опыты проводили, на цилиндрических образцах из стали 35 диам. 30 мм. Начальный диаметр образцов соответствовал обеспечению необходимой степени относительного обжатия при использовании одной матрицы. После изготовления образцов их отжигали в защитной среде для снятия остаточных напряжений. Охватывающее деформирование выполняли при использовании твердосплавных матриц (BK8) на гидравлической испытательной машине «Amsler». В качестве технологической смазки использовали сухой порошок натриевого мыла.

Степень относительного обжатия Q при охватывающем деформировании определяли по формуле

$$Q = \frac{D_n^2 - D_k^2}{D_n^2} \cdot 100 \%, \quad (5)$$

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

Для определения трехмерных полей распределения остаточных напряжений в заготовках валов использовали метод обтачивания и растачивания одного цилиндра, предложенный Г. Заксом [5, 13]. После удаления очередного концентрического слоя измеряли радиальные и осевые деформации цилиндра. Полученные результаты использовали для расчета главных компонент тензора остаточных напряжений:

$$\begin{aligned} \sigma_z^o &= \frac{E}{1-\nu^2} \left[(A_n - A) \frac{d(\varepsilon_z + \nu\varepsilon_\varphi)}{dA} - (\varepsilon_z + \nu\varepsilon_\varphi) \right]; \\ \sigma_\varphi^o &= \frac{E}{1-\nu^2} \left[(A_n - A) \frac{d(\varepsilon_\varphi + \nu\varepsilon_z)}{dA} - \frac{A_n + A}{2A} (\varepsilon_\varphi + \nu\varepsilon_z) \right]; \quad (6) \\ \sigma_r^o &= \frac{E}{1-\nu^2} \frac{A_n - A}{2A} (\varepsilon_\varphi + \nu\varepsilon_z), \end{aligned}$$

где σ_z^o , σ_φ^o и σ_r^o – соответственно осевые, тангенциальные и радиальные остаточные напряжения; E – модуль упругости первого рода; ν – коэффициент Пуансона; A_n – площадь, соответствующая наружному диаметру цилиндра; A – переменная площадь, соответствующая радиусу рассматриваемого слоя; ε_z и ε_φ – относительное изменение длины и наружного диаметра при растачивании цилиндра.

Экспериментальное оснащение, методика измерения деформаций и расчет остаточных напряжений подробно изложены в работах [4, 5].

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 от 5 до 34 %), угол рабочего конуса инструмента (2α от 8 до 24°) и длина калибрующей зоны (l_k от 0,1 до 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 [4, 5].

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

Угол конуса рабочей зоны волокна. Влияние угла конуса исследовали в интервалах его изменения 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 [21, 22]. 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 [4]. При этом установлено, что угол рабочего

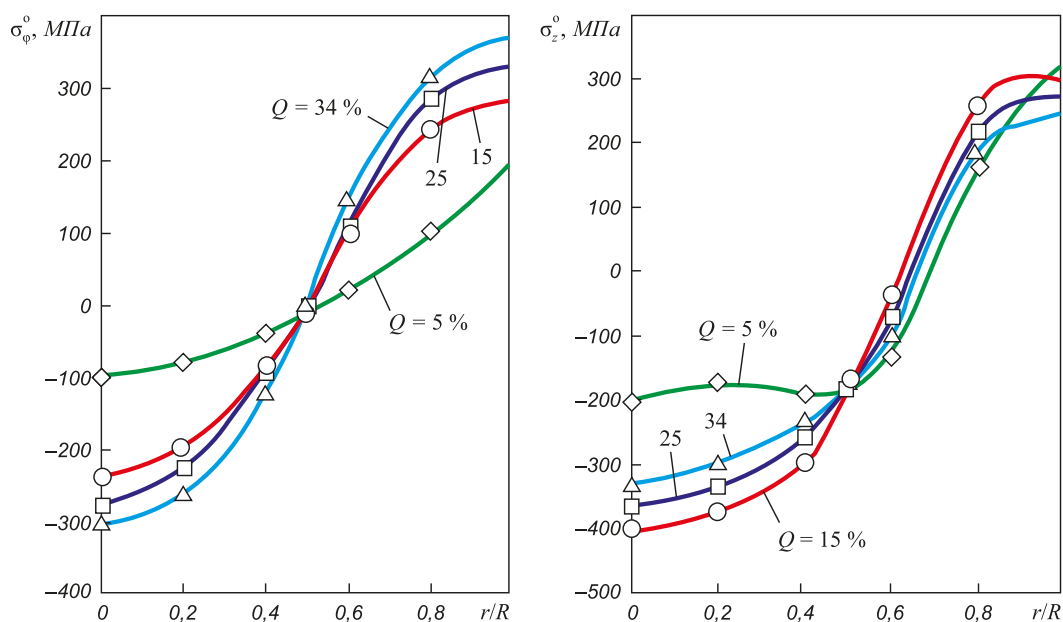


Рис. 1. Кривые распределения тангенциальных σ_{ϕ}^0 и осевых σ_z^0 остаточных напряжений по сечению калиброванного прутка в зависимости от степени обжатия

Fig. 1. Distribution curves of tangential σ_{ϕ}^0 and axial σ_z^0 of residual stresses over the cross section of the calibrated rod, depending on compression degree

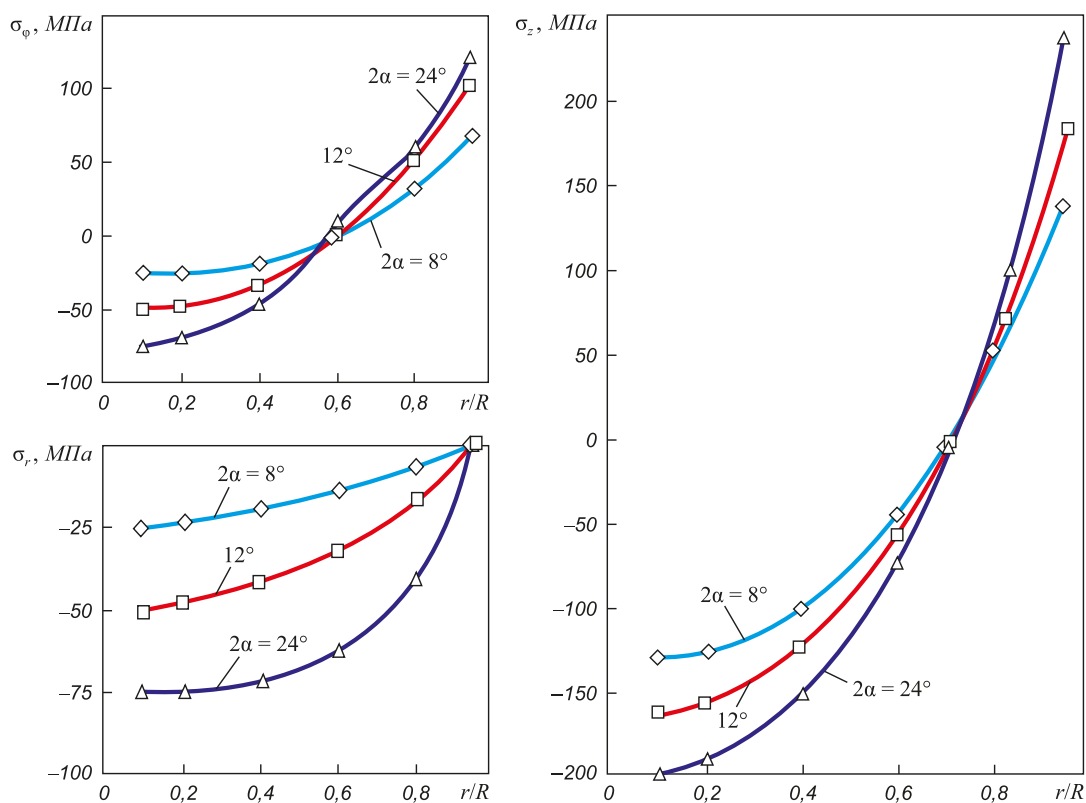


Рис. 2. Кривые распределения тангенциальных, осевых и радиальных остаточных напряжений в зависимости от угла рабочего конуса волоки ($Q = 4\%$)

Fig. 2. Distribution curves of tangential, axial and radial residual stresses, depending on die working cone angle ($Q = 4\%$)

конуса волоки большее влияние оказывает на осевые остаточные напряжения, чем на тангенциальные. Так, при изменении угла 2α от 8° до 24° (рис. 2) параметр $\sigma_{z_{\max}}$

возрастает в 2,3 раза, а $\sigma_{\phi_{\max}}$ – в 1,16 раза. Увеличение угла рабочего конуса волоки от 24° до 45° приводит к незначительному повышению остаточных напряже-

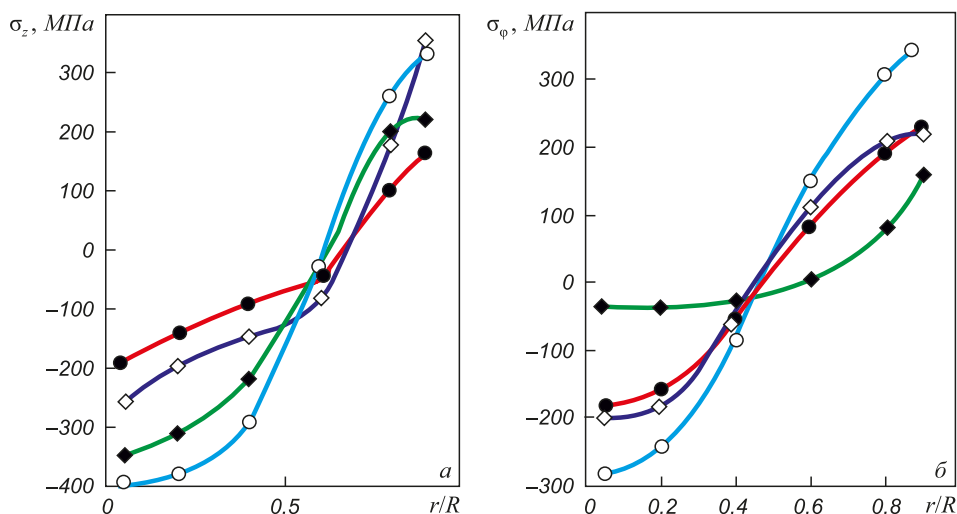


Рис. 3. Кривые распределения осевых (а) и тангенциальных (б) остаточных напряжений в зависимости от степени относительного обжатия и длины калибрующей зоны волокна ($2\alpha = 24^\circ$):

—◇— $Q = 6\%$, $l_k = 0,5$ мм; —◆— $Q = 6\%$, $l_k = 20,5$ мм; —○— $Q = 23\%$, $l_k = 0,5$ мм; —●— $Q = 23\%$, $l_k = 20,5$ мм

Fig. 3. Distribution curves of axial (a) and tangential (b) residual stresses, depending on the compression degree and the relative length of calibrating die zone ($2\alpha = 24^\circ$):

—◇— $Q = 6\%$, $l_k = 0,5$ мм; —◆— $Q = 6\%$, $l_k = 20,5$ мм; —○— $Q = 23\%$, $l_k = 0,5$ мм; —●— $Q = 23\%$, $l_k = 20,5$ мм

ний [22]. При уменьшении угла рабочего конуса волокна до 4° закономерность распределения осевых остаточных напряжений сохраняется, а тангенциальных — резко изменяется [4].

Длина калибрующей зоны. Используя метод планирования экспериментов, определили влияние длины калибрующей зоны инструмента на изменение остаточных напряжений в прутках [4]. Через X_1 обозначили величину обжатия Q , %, а через X_2 — длину калибрующей зоны l_k , мм.

Для статистической обработки результатов провели 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 параметра l_k с 0,5 до 20,5 мм ($Q = 23\%$) значения $\sigma_{z_{\max}}$ уменьшаются с 320 до 160 МПа, а $\sigma_{\phi_{\max}}$ — с 380 до 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 проведенных опытов получили следующие уравнения регрессии для максимальных значений принятых параметров оптимизации:

$$\sigma_{z_{\max}} = 245 - 0,5X_1 - 5,5X_2 - 25X_1X_2; \quad (7)$$

$$\sigma_{\phi_{\max}} = 257,5 + 57,5X_1 - 52,5X_2 - 12X_1X_2. \quad (8)$$

Знак и величина коэффициентов в уравнениях (7), (8) 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 о влиянии на остаточные напряжения длины калибрующей зоны. Так, при $l_k/d = 0,08$ имеем $\sigma_{z_{\max}} = 360$ МПа, а при $l_k/d = 0,49$ $\sigma_{z_{\max}} = 145$ МПа [4]. Таким образом, увеличение длины калибрующей зоны является эффективным средством для снижения остаточных напряжений в калиброванных прутках.

Результаты определения максимальных остаточных напряжений растяжения в зависимости от степени относительного обжатия (Q), угла рабочего конуса (2α) и относительной длины калибрующей зоны (l_k/d) инструмента представлены на рис. 4.

Полученные результаты позволяют сделать заключение о технологическом процессе с учетом целесообразного использования металла. С увеличением обжатия от 5 до 34 % тангенциальные остаточные напряжения возрастают в 2,5 раза, а осевые уменьшаются на 13 % (рис. 4, а). Необходимо подчеркнуть, что величина обжатия сказывается в большей мере на тангенциальных остаточных напряжениях, чем на осевых.

Результаты экспериментов показали (рис. 4, б), что в диапазоне углов волокна от 8° до 24° тангенциальные и осевые остаточные напряжения одновременно увеличивается: $\sigma_{z_{\max}}$ возрастают в 2,3 раза, а $\sigma_{\phi_{\max}}$ — в 1,8 раза.

Как видно из рис. 4, в, с увеличением длины калибрующей зоны максимальные осевые остаточные напряжения растяжения снижаются на 52 %, а тангенциальные увеличиваются на 21 %.

Выводы. С использованием методики математического планирования экспериментов установлено влия-

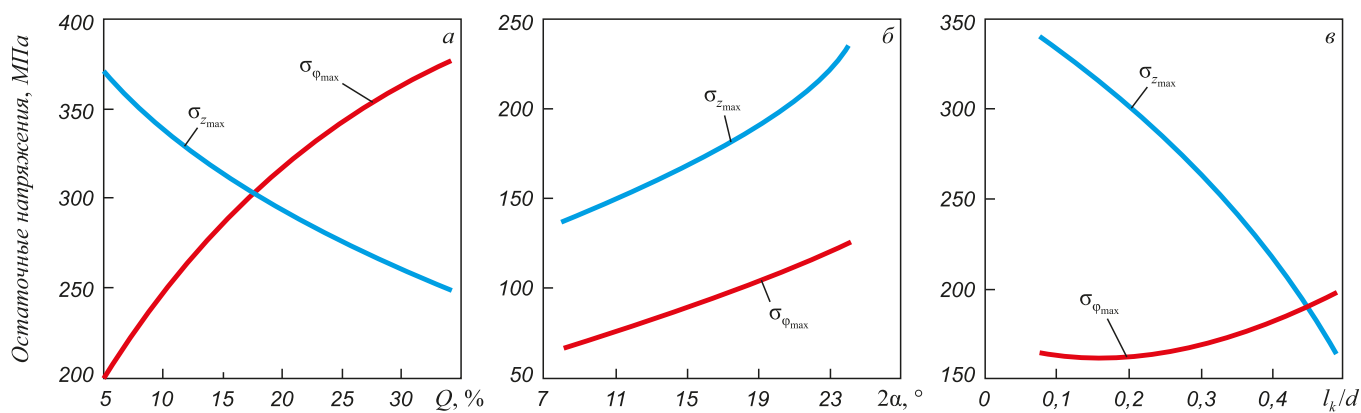


Рис. 4. Влияние степени относительного обжатия (а), угла рабочего конуса (б) и относительной длины калибрующей зоны волокна (в) на максимальные значения тангенциальных и осевых остаточных напряжений растяжения

Fig. 4. Influence of relative reduction (а), working cone angle (б) and relative length of calibrating die zone (в) on the maximum values of tangential and axial residual tensile stresses

яние 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 происходит на глубине $(0,5 - 0,8)r/R$. Выявлено, что при режимах калибровки, которые используют 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 остаточные напряжения – сжимающие.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Шефтель Н.И. Улучшение качества и сортамента проката. – М.: Металлургия, 1973. – 343 с.
2. Недовизий И.Н., Завалишин Н.И. Основные пути повышения эффективности использования металла в метизном производстве. – В кн.: Повышение эффективности использования металла в метизном производстве. – М.: Металлургия, 1983. С. 7 – 16.
3. Стальная проволока / Х.Н. Белалов, А.А. Клековкин, Н.А. Клековкина и др. – Магнитогорск: ИЦ МГТУ, 2011. – 689 с.
4. Зайдес С.А. Остаточные напряжения и качество калиброванного металла. – Иркутск: изд. ИрГТУ, 1992. – 200 с.
5. Зайдес С.А. Охватывающее поверхностное пластическое деформирование. – Иркутск: изд. ИрГТУ, 2001. – 309 с.
6. Соколов И.А., Уральский В.И. Остаточные напряжения и качество металлопродукции. – М.: Металлургия, 1981. – 97 с.
7. Поздеев А.А., Няшин Ю.И., Трусков П.В. Остаточные напряжения. Теория и приложения. – М.: Наука, 1982. – 111 с.
8. Вишняков Я.Д., Пискарев В.Д. Управление остаточными напряжениями в металлах и сплавах. – М.: Металлургия, 1989. – 253 с.
9. 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.
10. Алексеев П.Г. Устойчивость остаточных напряжений и их влияние на износостойкость деталей, упрочненных наклепом. – В кн.: Повышение эксплуатационных свойств деталей поверхностным пластическим деформированием. – М.: МДНТП, 1971. С. 76 – 79.
11. Остаточные напряжения / Под ред. С.С. Макаревича. – Минск: УП «Технопринт», 2003. – 316 с.
12. Технологические остаточные напряжения / Под ред. А.В. Подзезя. – 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. Шморгунов, А.А. Храпов. – М.: Металлургиздат, 2010. – 237 с.
15. Зайдес С.А., Климова Л.Г. Управление технологическими остаточными напряжениями в малоэластичных валах охватывающим деформированием // Вестник ИрГТУ. 2006. № 4 (28). С. 58 – 61.
16. Русаков А.А. Рентгенография металлов. – М.: Атомиздат, 1977. – 237 с.
17. Tekkaya A.E., Gerhardt I. Residual Stresses in Gold-Formed Workpieces // Annals of the CIRP. 1985. 34/1. P. 225–230.
18. Tszeng T.C., Kobayashi S. Determination of Residual Stresses in Radial Forming Proceedings // Manufacturing Simulation and Processes the Winter Annual Meeting of the American Society of Mechanical Engineers. 1986. P. 31 – 45.
19. Коковихин Ю.И., Туктамышев И.Ш., Поляков М.Г. Методическое пособие по математическому планированию экспериментов. – Магнитогорск: изд. МГТУ, 1973. Ч. 1-2. – 76 с.
20. Новик Ф.С. Математические методы планирования экспериментов в металлостроении. Разд. 1. Общие представления о планировании экспериментов. Планы первого порядка. – М.: МИСиС. 1969. – 82 с.
21. Берин И.Ш., Днестровский Н.З. Волоочильный инструмент. – М.: Машиностроение, 1971. – 174 с.
22. Дружинина Т.Я., Зайдес С.А., Аркулис Г.Э. и др. Остаточные напряжения в калиброванном металле и способы их регулирования. – В кн.: Остаточные напряжения и методы регулирования. Тр. Всесоюз. симпози. по остаточным напряжениям. – М.: Институт проблем механики АН СССР. 1982. С. 175 – 180.

Поступила 15 октября 2016 г.

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 prevent residual stresses formed during cold deformation. The aim of this study was to determine the main calibration parameters that influence the formation of residual stresses. 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 the calibration process on the residual stress state. For the account of simultaneous effect on the residual stresses of the relative compression, angle of the working cone of the die, calibration speed and lubrication quality the fractional four-factor experiment has been planned and implemented. These experiments have shown that the parameters of the calibration process significantly affect the residual stresses, which vary not only in magnitude but also in sign. Experimental results have shown that the range of angles of the die was from 8 to 24°, the tangential and axial residual stresses increase simultaneously: increase by 2.3 and 1.8 times. With the increase in the length of the gauge zones maximum axial residual tensile stresses are reduced by 52 % and tangential increased by 21 %. The influence of the main parameters of the calibration process on the size and nature of the distribution over the cross section of cylindrical rods of axial, radial and tangential residual stresses was determined. Changing the sign of the residual stress depends on the deformation parameters and occurs at a depth of $(0.5 - 0.8)r/R$. It was revealed that at the calibration mode that is used in the production the axial and tangential residual tensile stresses are formed in the peripheral layers of rods at cold forming, and in the central layers – the compressive stresses are formed. Radial residual stresses at the surface are zero, and in the rest of the body volume residual stresses are compressive.

Keywords: calibrated metal, residual stresses, calibration parameters, compression, working cone angle, length of the gauge area.

DOI: 10.17073/0368-0797-2017-2-109-115

REFERENCES

1. Sheftel' N.I. *Uluchshenie kachestva i sortamenta prokata* [Improvement of the quality and rolled products range]. Moscow: Metallurgiya, 1973, 343 p. (In Russ.).
2. Nedovizii I.N., Zavalishin N.I. Main ways to increase the efficiency of the usage of metals in hardware production. In: *Povyshenie effektivnosti ispol'zovaniya metalla v metiznom proizvodstve* [Increase the efficiency of the usage of metals in hardware production]. Moscow: Metallurgiya, 1983, pp. 7–16. (In Russ.).
3. Belalov Kh.N., Klekovkin A.A., Klekovkina N.A. etc. *Stal'naya provoloka* [Steel wire]. Magnitogorsk: ITs MGTU, 2011, 689 p. (In Russ.).
4. Zaides S.A. *Ostatochnye napryazheniya i kachestvo kalibrovannogo metalla* [Internal stresses and quality of calibrated metal]. Irkutsk: IrGTU, 1992, 200 p. (In Russ.).
5. Zaides S.A. *Okhvatyvayushchee poverkhnostnoe plasticheskoe deformirovanie* [Cover surface plastic deformation]. Irkutsk: IrGTU, 2001, 309 p. (In Russ.).
6. Sokolov I.A., Ural'skii V.I. *Ostatochnye napryazheniya i kachestvo metalloproduktov* [Internal stresses and quality of metal products]. Moscow: Metallurgiya, 1981, 97 p. (In Russ.).
7. Pozdeev A.A., Nyashin Yu.I., Trusov P.V. *Ostatochnye napryazheniya. Teoriya i prilozheniya* [Internal stresses. Theory and supplement]. Moscow: Nauka, 1982, 111 p. (In Russ.).
8. Vishnyakov Ya.D., Piskarev V.D. *Upravlenie ostatochnymi napryazheniyami v metallakh i splavakh* [Control of internal stresses in metals and alloys]. Moscow: Metallurgiya, 1989, 253 p. (In Russ.).
9. Skorokhodov A.N., Zudov E.G., Kirichkov A.A., Petrenko Yu.P. *Ostatochnye napryazheniya v profilyakh i sposoby ikh snizheniya* [Internal stresses in cross-sections and ways of their reduction]. Moscow: Metallurgiya, 1985, 185 p. (In Russ.).
10. Alekseev P.G. Resistance of internal stresses and their influence on durability, hardened with cold hardening. 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.).
11. *Ostatochnye napryazheniya* [Internal stresses]. Makarevich S.S. ed. Minsk: UP Tekhnoprint, 2003, 316 p. (In Russ.).
12. *Tekhnologicheskie ostatochnye napryazheniya* [Technological internal stresses]. Podzei A.V. ed. Moscow: Mashinostroenie, 1973, 216 p. (In Russ.).
13. Birger I.A. *Ostatochnye napryazheniya* [Internal stresses]. Moscow: Mashgiz, 1963, 232 p. (In Russ.).
14. Trykov Yu.P., Pokataev E.P., Shmorgun V.G., Khrapov A.A. *Ostatochnye napryazheniya v sloistnykh kompozitakh* [Internal stresses in layered composites]. Moscow: Metallurgizdat, 2010, 237 p. (In Russ.).
15. Zaides S.A., Klimova L.G. Control of technological internal stresses in low-abrasive trucks with braced deformation. *Vestnik IrGTU*. 2006, no. 4 (28), pp. 58–61. (In Russ.).
16. Rusakov A.A. *Rentgenografiya metallov* [Metal X-ray diffraction]. Moscow: Atomizdat, 1977, 237 p. (In Russ.).
17. Tekkaya A.E., Gerhardt I. Residual stresses in cold-formed workpieces. *Annals of the CIRP*. 1985, vol. 34, no. 1, pp. 225–230.
18. Tszeng T.C., Kobayashi S. Determination of residual stresses in radial forming proceedings. *Manufacturing Simulation and Processes the Winter Annual Meeting of the American Society of Mechanical Engineers*. 1986, pp. 31–45.
19. Kokovikhin Yu.I., Tuktamyshev I.Sh., Polyakov M.G. *Metodicheskoe posobie po matematicheskomu planirovaniyu eksperimentov* [Study guide in mathematical planning of experiments]. Magnitogorsk: MGTU, 1973, Part 1-2. 76 p. (In Russ.).
20. Novik F.S. *Matematicheskie metody planirovaniya eksperimentov v metallovedenii. Razd. 1: Obshchie predstavleniya o planirovanii eksperimentov. Plany pervogo poryadka* [Mathematical methods of planning experiments in metallurgical science. Section 1. General overview of the experiment planning. Plans of the first order]. Moscow: MISiS, 1969, 82 p. (In Russ.).
21. Berin I.Sh., Dnestrovskii N.Z. *Volochil'nyi instrument* [Drawing tool]. Moscow: Mashinostroenie, 1971, 174 p. (In Russ.).
22. Druzhinina T.Ya., Zaides S.A., Arkulis G.E. etc. Internal stresses in calibrated metal and ways of their control. In: *Ostatochnye napryazheniya i metody regulirovaniya. Tr. Vsesoyuz. simpoz. po ostatochnym napryazheniyam* [Residual stresses and methods of their regulation. Papers of All-Union. Symp. on Residual Stresses]. Moscow: Institut problem mekhaniki AN SSSR, 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)
 Nguen Van Khuan, Postgraduate (nguyenvanhuan.istu@gmail.com)

Received 15 October, 2016