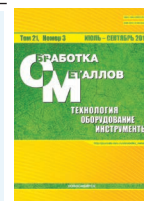








Обработка металлов (технология • оборудование • инструменты)

Сайт журнала: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov

Исследование изменения сопротивления деформации низкоуглеродистой стали в процессе ротационной вытяжки с утонением стенки

Александр Удалов^{1, а, *}, Андрей Удалов^{2, б}¹ Вятский государственный университет, ул. Московская, 36, г. Киров, 610000, Россия² Уральский федеральный университет им. первого Президента России Б.Н. Ельцина, ул. Мира, 19, г. Екатеринбург, 620002, Россия^а  <https://orcid.org/0000-0003-0210-5423>,  a.v.udalov1960@gmail.com, ^б  <https://orcid.org/0000-0003-0886-3014>,  a.a.udalov1992@gmail.com

ИНФОРМАЦИЯ О СТАТЬЕ

УДК 621.774

История статьи:

Поступила: 28 апреля 2019

Рецензирование: 16 мая 2019

Принята к печати: 26 июня 2019

Доступно онлайн: 15 сентября 2019

Ключевые слова:

Ротационная вытяжка

Конический ролик

Твердость

Сопротивление деформации

Кривая упрочнения

АННОТАЦИЯ

Введение. Основным параметром, определяющим эффективность и качество процесса ротационной вытяжки с утонением стенки, является значение и характер распределения сопротивления деформации материала по толщине стенки заготовки. В технической литературе, посвященной изучению данного процесса, содержится недостаточно информации, позволяющей корректно назначать технологические режимы и условия обработки. Статья посвящена экспериментальному исследованию изменения сопротивления деформации низкоуглеродистой стали в процессе ротационной вытяжки с утонением стенки в зависимости от степени деформации и угла конусности деформирующего ролика. **Целью работы** является определение неравномерности распределения сопротивления деформации низкоуглеродистой стали по толщине стенки заготовки после ротационной вытяжки с утонением в зависимости от степени деформации и угла конусности деформирующего ролика. **Методы исследования.** Процесс ротационной вытяжки заготовок, имеющих исходную толщину стенки 6,5 мм и наружный диаметр 203 мм, осуществлялся на трехроlikовом горизонтально-раскатном станке СРГ-0,6-1500 по прямому способу. Пластическое формоизменение материала заготовок выполнялось при различных степенях деформации на оправке диаметром 190 мм деформирующими роликами диаметром 260 мм с углом конусности равным 20 и 30°. Сопротивления деформации материала по толщине стенки определялось на продольных образцах, вырезанных из обработанных заготовок, методом внедрения индентора с измерением твердости наконечником Виккерса. Неравномерность распределения сопротивления деформации оценивалась коэффициентом, определяемым как отношение сопротивлений деформации наружной поверхности к сопротивлению деформации внутренних объемов стенки заготовки. **Результаты и обсуждения.** Наибольшие значения сопротивления деформации были получены на наружной поверхности заготовок, обработанных роликом, а наименьшие значения зафиксированы во внутреннем объеме стенки заготовок. Оценка неравномерности распределения сопротивления деформации по толщине стенки заготовки выполнена с помощью коэффициента неравномерности, равного отношению сопротивлений деформации наружного слоя и внутренних объемов стенки заготовки. Выявлено, что наиболее опасными зонами, подверженными разрушению в процессе ротационной вытяжки, являются внутренние объемы материала, прилегающие к наружному поверхностному слою заготовки. Установлено, что коэффициент неравномерности распределения напряжений при обработке роликом с углом конусности $\alpha = 30^\circ$ примерно на 10 % больше, чем с углом конусности $\alpha = 20^\circ$. С увеличением степени деформации коэффициент неравномерности распределения напряжений возрастает, но очень незначительно. Полученные закономерности объясняются, в частности, наплавом, который образуется перед роликом. По полученным результатам даны общие рекомендации по назначению степени деформации и угла конусности ролика при выполнении ротационной вытяжки. Кроме того, получены эмпирические зависимости деформационного упрочнения материала для различных объемов заготовки. Предлагаемая методика определения неравномерности распределения напряжений может быть использована при разработке процессов обработки давлением и в проектировочных расчетах элементов конструкций.

Для цитирования: Удалов А.В., Удалов А.А. Исследование изменения сопротивления деформации низкоуглеродистой стали в процессе ротационной вытяжки с утонением стенки // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2019. – Т. 21, № 3. – С. 59–71. – DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.3-59-71.

*Адрес для переписки

Удалов Александр Викторович, к.т.н., доцент

Вятский государственный университет,

ул. Московская, 153-35,

610048, г. Киров, Россия

Тел.: +7 (922) 930-72-45, e-mail: a.v.udalov1960@gmail.com

Введение

Ротационная вытяжка с утонением стенки относится к процессам обработки металлов давлением с созданием локального очага деформации

ции и может выполняться прямым и обратным способом (рис. 1). Данный процесс широко используется при изготовлении осесимметричных деталей с постоянной и переменной толщиной стенки [1–4]. Деформирующими элементами являются цилиндрическая оправка и ролик, имеющий коническую или торообразную форму. В процессе обработки ролик совершает качение по вращающейся заготовке с заданной осевой подачей и обеспечивает принудительное утонение стенки до требуемого значения. В пределах геометрического очага деформации материал находится в условиях неравномерного всестороннего сжатия, что в значительной степени усложняет теоретическое исследование напряженно-деформированного состояния данного процесса. Это обуславливает то, что совершенствование технологии процесса ротационной вытяжки базируется в основном на результатах эксперимен-

тальных исследований, на основании которых разрабатываются различные теоретические модели [5–13].

В работе [5] на основании экспериментальных данных определены оптимальные значения подачи ролика, абсолютного утонения стенки, а также зазора между оправкой и заготовкой, обеспечивающие наилучшую точность и качество обработки. В работе [6] теоретически исследована и экспериментально подтверждена степень влияния частоты вращения заготовки, интенсивности подачи охлаждающей жидкости и осевой подачи на шероховатость обработанной поверхности. В работе [7] исследовалось влияние параметров процесса ротационной вытяжки с утонением на изменение структуры углеродистой стали. На основании известных экспериментальных и теоретических исследований разработана общая методика проектирования процесса

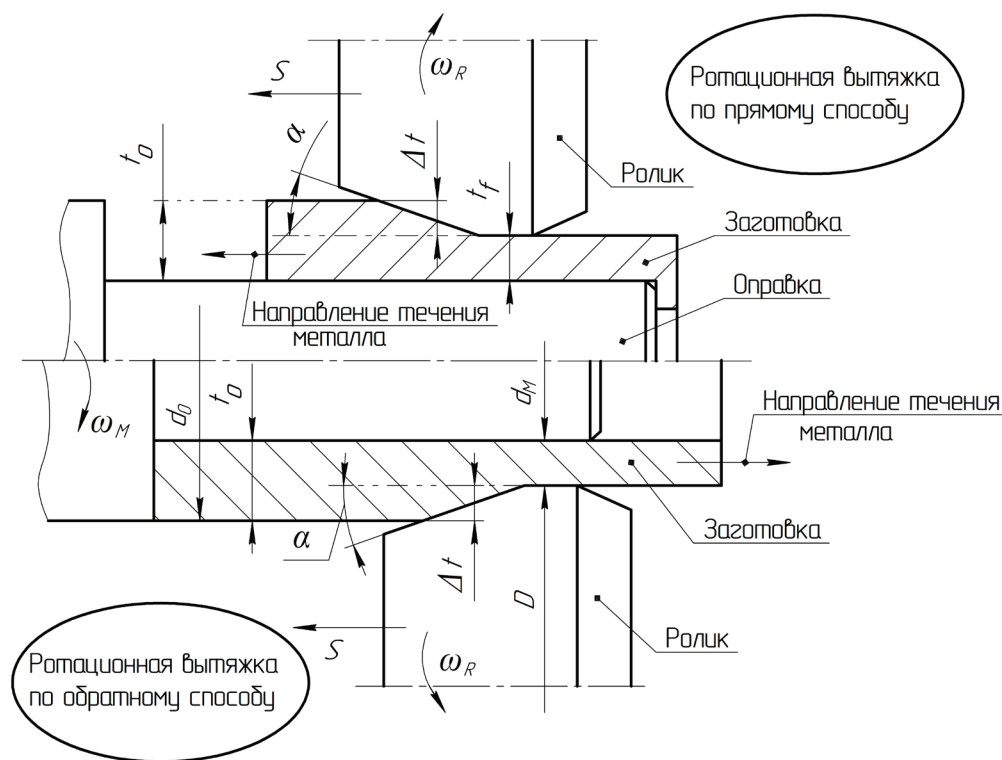


Рис. 1. Принципиальные схемы ротационной вытяжки с утонением стенки:

ω_M – угловая скорость оправки; ω_R – угловая скорость ролика; S – осевая подача ролика; D – диаметр ролика; α – угол конусности ролика; d_0 – наружный диаметр исходной заготовки; d_M – диаметр оправки; t_0 и t_f – начальная и конечная толщина стенки заготовки; Δt – абсолютная деформация стенки заготовки

Fig. 1. Schematic diagrams of flow forming:

ω_M – angular velocity of the mandrel; ω_R – angular velocity of the roller; S – axial feed roller; D – diameter of the roller; α – angle of the roller taper; d_0 – outer diameter of the original workpiece; d_M – diameter of the mandrel; t_0 and t_f – the initial and final wall thickness of the workpiece; Δt – absolute deformation of the wall of the workpiece

ротационной вытяжки с утонением стенки [8], учитывающая основные факторы, влияющие на точность и качество обработки. Влияние частоты вращения заготовки, осевой подачи ролика и степени деформации на погрешности формы обработанной цилиндрической поверхности детали рассмотрено в работе [9]. Основные факторы, оказывающие действие на неравномерность пластического течения материала в процессе ротационной вытяжки по обратному способу, рассмотрены в работе [10]. В работах [11, 12] определены предельные значения степени деформации в процессе ротационной вытяжки с утонением в зависимости от геометрических параметров деформирующих роликов. Разработано новое устройство для ротационной вытяжки с утонением [13], позволяющее повысить точность и качество обработки.

Особую роль при разработке процесса ротационной вытяжки приобретает правильная оценка деформаций и напряжений, которые в условиях локального нагружения обладают значительной неравномерностью распределения по толщине стенки заготовки [3, 14, 15].

В общем случае неравномерность напряженно-деформированного состояния материала в очаге деформации ограничивает возможности процесса и вызывает появление брака в виде трещин и шелушения. Кроме того, после заключительной технологической обработки в готовой детали возникают неблагоприятные остаточные напряжения, способные вызвать разрушение в процессе эксплуатации. Выбор метода исследования напряженно-деформированного состояния зависит практически от всех технологических параметров процесса и в каждом конкретном случае решается индивидуально.

Основные моменты, вызывающие неравномерность деформаций и напряжений, а также экспериментальные методы их определения рассмотрены в работах [16–19].

Процессы обработки давлением с преобладающей схемой объемного напряженного состояния, к которым относится и ротационная вытяжка, исследуются, как правило, численным моделированием с использованием метода конечных элементов [20–23].

Несмотря на значительный опыт экспериментальных и теоретических исследований, назначение технологических режимов, обеспе-

чивающих требуемую точность и качество обработки, и на сегодняшний день остается актуальной проблемой при проектировании процесса ротационной вытяжки с утонением стенки. Основным обстоятельством, влияющим на силовые параметры процесса обработки давлением и качество готовой продукции, является закон изменения сопротивления деформации материала (кривая упрочнения), который может быть определен только экспериментально. При этом схема напряженно-деформированного состояния материала при проведении эксперимента должна быть максимально приближена к условиям реального процесса обработки давлением.

Целью экспериментальных исследований является определение неравномерности распределения сопротивления деформации низкоуглеродистой стали по толщине стенки заготовки после ротационной вытяжки с утонением в зависимости от степени деформации и угла конусности деформирующего ролика.

Методика проведения экспериментального исследования

В процессах обработки давлением изменение сопротивления деформации материала представляется в виде степенной зависимости [24]

$$\sigma_S = \sigma_{S0} + g(\sqrt{3} \cdot \varepsilon)^b. \quad (1)$$

Процесс ротационной вытяжки с утонением стенки протекает преимущественно в условиях неравномерного всестороннего сжатия. В соответствии с этим исследование изменения сопротивления деформации было выполнено методом внедрения индентора [25], при котором возникает аналогичная схема напряженного состояния материала заготовки. Метод внедрения индентора позволяет определять сопротивление деформации практически в любой точке по всему объему заготовки, что является его основным достоинством.

В соответствии с работой [25] сопротивление деформации материала после обработки давлением определяется по формуле

$$\sigma_S = \sigma_{S0} \frac{HV_f}{HV_0}, \quad (2)$$

где HV_0 и HV_f – твердость по Виккерсу исходного и упрочненного материала соответственно.

Таким образом, экспериментальное исследование изменения сопротивления деформации материала в процессе ротационной вытяжки состояло из следующих этапов.

1. Подготовка исходных заготовок и измерение их твердости (HV_0).

2. Ротационная вытяжка исходных заготовок при различных степенях деформации стенки и углах конусности деформирующего ролика.

3. Измерение твердости в заданных точках материала обработанных заготовок (HV_f) и определение сопротивления деформации по формуле (2).

4. Аппроксимация полученных экспериментальных данных с целью получения степенной зависимости деформационного упрочнения (1).

5. Определение неравномерности распределения сопротивления деформации по толщине стенки деформированной заготовки.

Условия проведения эксперимента

Ротационная вытяжка исходных заготовок выполнялась по прямому способу на горизонтально-раскатном станке СРГ-0,6-1500. Количество деформирующих роликов равно трем (рис. 2). Перед обработкой ролики устанавливаются в одной плоскости, перпендикулярной оси вращения заготовки, и настраиваются на одинаковое утонение толщины стенки Δt , т. е. ротационная вытяжка производилась без разделения очага деформации.

Ротационная вытяжка производилась при осевой подаче роликов $S = 1$ мм/об и частоте вращения заготовки $n = 54$ мин⁻¹.

В процессе испытаний использовались конические ролики открытой калибровки (рис. 3) диаметром $D = 260$ мм и рабочей поверхностью с углом конусности $\alpha = 20^\circ$ и $\alpha = 30^\circ$. Угол конусности задней поверхности ролика принимался равным $\alpha_1 = 20^\circ$. Ширина калибрующего пояса ролика $b = 3$ мм. Радиус закругления переходной поверхности при вершине ролика $r = 2$ мм. Диаметр оправки $d_M = 190$ мм. Материал ролика и оправки – сталь ХВГ (ГОСТ 5950–2000), имеющая значение твердости после окончательной термообработки 58...62 HRC.

Исходной заготовкой является горячедеформированная труба (ГОСТ 8732–78) с наружным диаметром 219 мм и толщиной стенки 20 мм.

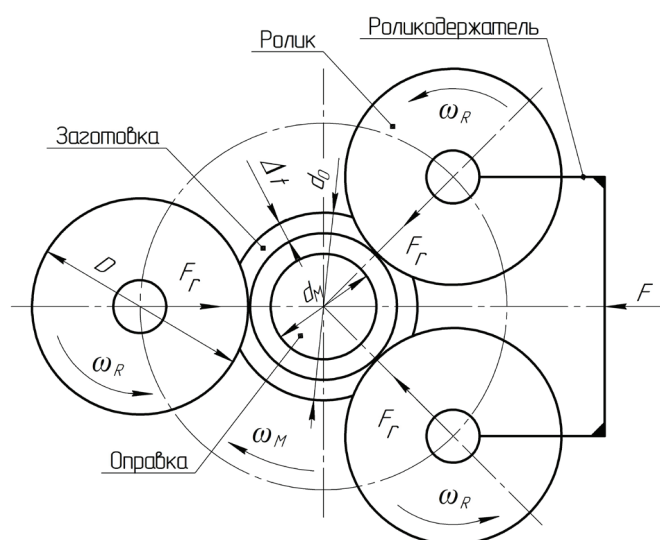


Рис. 2. Трехроликовая схема ротационной вытяжки с утонением стенки на горизонтально-раскатном станке СРГ-0,6-1500:

F_r – радиальная сила на одном ролике; F – сила прижима роликодержателя

Fig. 2. Three-roller scheme of flow forming on a horizontal roll machine SRG-0,6-1500:

F_r – radial force on one roller; F – force preload of roller holder

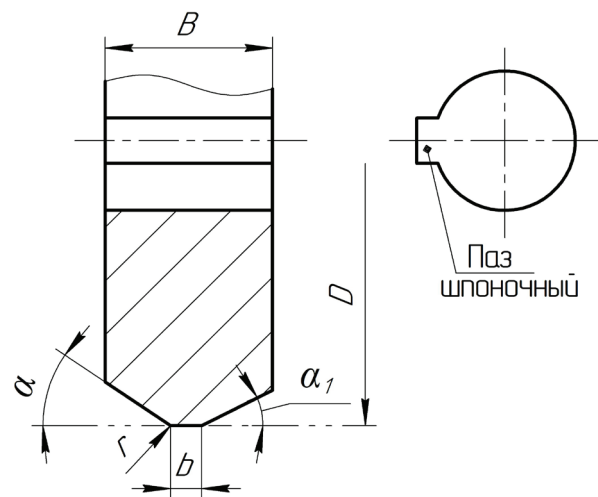


Рис. 3. Геометрические параметры ролика с открытой калибровкой

Fig. 3. Geometric parameters of the roller with open calibration

Материал исходной заготовки – сталь 20 (ГОСТ 1050–88). Исходная труба была разрезана на мерные заготовки длиной $\ell = 200$ мм. Полученные мерные заготовки подвергнуты отжигу в одной печи при температуре 920 °С в течение 20 мин с последующим охлаждением.

Твердость стали мерных заготовок в исходном состоянии (HV_0) определена с помощью твердомера ТВМ 1000 при нагрузке $F = 98,07$ Н в соответствии с ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007. При этом для каждой заготовки выполнялось по десять измерений твердости. Среднее значение твердости исходного материала после отжига составило примерно $\overline{HV}_0 \approx 147$.

Предел текучести исходного материала σ_{S0} определен методом испытания на сжатие в соответствии с ГОСТ 25.503-97. С этой целью трубная заготовка предварительно разрезалась в осевом направлении на полосы, из которых были изготовлены шесть образцов квадратного сечения со стороной квадрата 6 мм. Предел текучести на сжатие исходного материала составил $\sigma_{S0} \approx 260$ МПа.

Окончательные размеры заготовок по наружной и внутренней поверхности получены точением. Шероховатость наружной и внутренней поверхности заготовок $R_a = 2,5 \dots 3,2$ мкм. Толщина стенки исходной заготовки составила $t_0 = 6,5$ мм. Номинальный внутренний диаметр заготовки равен диаметру оправки 190 мм и обеспечивает ее свободную установку перед ротационной вытяжкой с минимальным гарантированным зазором. Эскиз заготовки, подготовленной для ротационной вытяжки, показан на рис. 4, а ее общий вид – на рис. 5.

Проведение эксперимента

Подготовленные заготовки были подвергнуты ротационной вытяжке по прямому способу с различной степенью деформации стенки $\varepsilon_{\Delta t}$, которая определялась по формуле

$$\varepsilon_{\Delta t} = \frac{t_f - t_0}{t_0}. \quad (3)$$

Значения степени деформации $\varepsilon_{\Delta t}$ представлены в табл. 1 и 2. Для каждой степени деформации использовалось по три заготовки. С целью определения твердости HV_f материала обработанных заготовок (рис. 6) из них были вырезаны продольные полосы (рис. 7), которые затем были разрезаны в поперечном направлении на четыре части для удобства подготовки поверхностей и выполнения измерений.

Измерение твердости производилось в соответствии с ГОСТ Р ИСО 6507-1-2007 на боковой

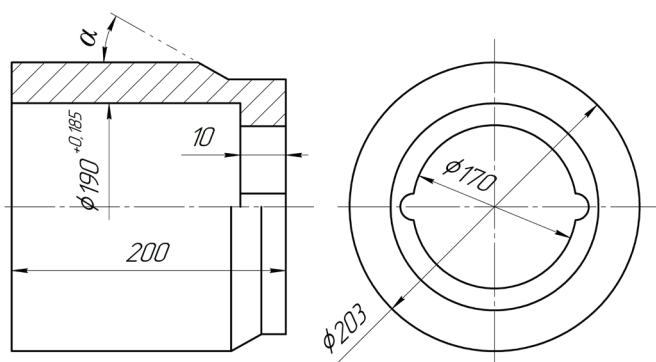


Рис. 4. Эскиз заготовки

Fig. 4. Workpiece sketch



Рис. 5. Общий вид заготовки

Fig. 5. Workpiece overview



Рис. 6. Заготовки, подвергнутые ротационной вытяжке

Fig. 6. Workpieces after flow forming

грани, на наружной и внутренней поверхности подготовленных образцов (рис. 8) при нагрузке $F = 98,07$ Н. На каждой поверхности выполнялось не менее 10 измерений с последующим определением среднего значения твердости для каждой поверхности в отдельности по формуле

$$\overline{HV}_f = \frac{\sum_{i=1}^n HV_{fi}}{n}, \quad (4)$$

где i – номер измерения; n – количество измерений твердости; \overline{HV}_f – среднее значение твердости для заданной поверхности.

Результаты исследования стальных ($\sigma_{S0} \approx 260$ МПа; $\overline{HV}_0 \approx 147$) заготовок, подвергнутых ротационной вытяжке роликом с углом конусности $\alpha = 20^\circ$

The study results of steel ($\sigma_{S0} \approx 260$ МПа; $\overline{HV}_0 \approx 147$) workpieces subjected to a flow forming with a roller with a taper angle $\alpha = 20^\circ$

Параметр		Значение				
Деформационные условия	$\varepsilon_{\Delta t}$	0,15	0,2	0,27	0,34	0,41
	ε	0,16	0,22	0,31	0,41	0,52
Наружная поверхность	\overline{HV}_{f1}	193	201	209	218	223
	σ_{S1} , МПа	341,2	354,6	370	385	395
	Степенная зависимость	$\sigma_{S1} = 260 + 132(\sqrt{3} \cdot \varepsilon)^{0,3}$				
Боковая поверхность	\overline{HV}_{f2}	180	185	190	197	202
	σ_{S2} , МПа	318,8	327	337	350	357
	Степенная зависимость	$\sigma_{S2} = 260 + 93(\sqrt{3} \cdot \varepsilon)^{0,297}$				
Внутренняя поверхность	\overline{HV}_{f3}	184	190	195	202	209
	σ_{S3} , МПа	326	335,4	345	356,5	360
	Степенная зависимость	$\sigma_{S3} = 260 + 102(\sqrt{3} \cdot \varepsilon)^{0,299}$				
Коэффициент неравномерности	δ_σ	1,070	1,084	1,097	1,100	1,106

Примечание: $\varepsilon = \ln \frac{t_0}{t_f}$ – истинная деформация стенки заготовки; \overline{HV}_{f1} , \overline{HV}_{f2} , \overline{HV}_{f3} – средние значения твердости

по Виккерсу соответственно на наружной, боковой и внутренней поверхности образца (рис. 8) после ротационной вытяжки; σ_{S1} , σ_{S2} , σ_{S3} – сопротивление деформации материала соответственно на наружной, боковой и внутренней поверхности образца, определяемое по формуле (5)



Рис. 7. Продольный образец, вырезанный из обработанной заготовки

Fig. 7. Longitudinal specimen cut from treated workpiece

Пример расположения зон индентирования при измерении твердости показан на рис. 9. Результаты измерения твердости представлены в табл. 1 и 2. Сопротивление деформации материала определялось для каждой поверхности образца в соответствии с формулой (2), в кото-

рой значения твердости HV_0 и HV_f заменены их средними значениями:

$$\sigma_S = \sigma_{S0} \frac{\overline{HV}_f}{\overline{HV}_0} \quad (5)$$

Результаты исследования стальных ($\sigma_{S0} \approx 260$ МПа; $\overline{HV}_0 \approx 147$) заготовок, подвергнутых ротационной вытяжке роликом с углом конусности $\alpha = 30^\circ$

The study results of steel ($\sigma_{S0} \approx 260$ МПа; $\overline{HV}_0 \approx 147$) workpieces subjected to a flow forming with a roller with a taper angle $\alpha = 30^\circ$

Параметр		Значение				
Деформационные условия	$\varepsilon_{\Delta t}$	0,2	0,3	0,37	0,41	0,45
	ε	0,22	0,36	0,46	0,52	0,58
Наружная поверхность	\overline{HV}_{f1}	223	234	244	252	255
	σ_{S1} , МПа	395	415	432	445	451
	Степенная зависимость	$\sigma_{S1} = 260 + 185,8(\sqrt{3} \cdot \varepsilon)^{0,314}$				
Боковая поверхность	\overline{HV}_{f2}	191	199	204	209	211
	σ_{S2} , МПа	339,3	352,6	362	370	373
	Степенная зависимость	$\sigma_{S2} = 260 + 109,7(\sqrt{3} \cdot \varepsilon)^{0,3}$				
Внутренняя поверхность	\overline{HV}_{f3}	190	197	201	206	209
	σ_{S3} , МПа	336	348	355,6	364,5	369,7
	Степенная зависимость	$\sigma_{S3} = 260 + 104,4(\sqrt{3} \cdot \varepsilon)^{0,3}$				
Коэффициент неравномерности	δ_σ	1,164	1,177	1,193	1,202	1,209

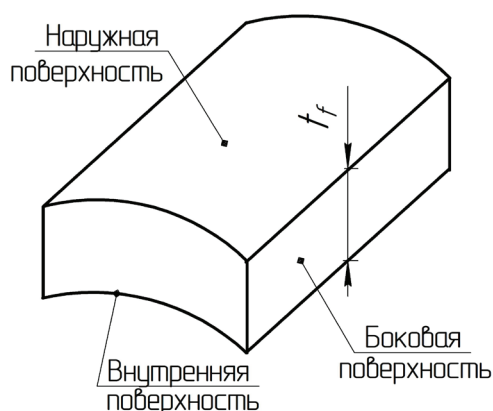
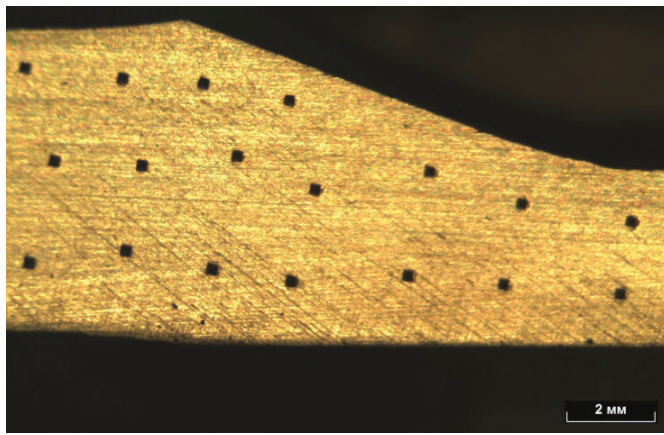


Рис. 8. Поверхности образца для измерения твердости

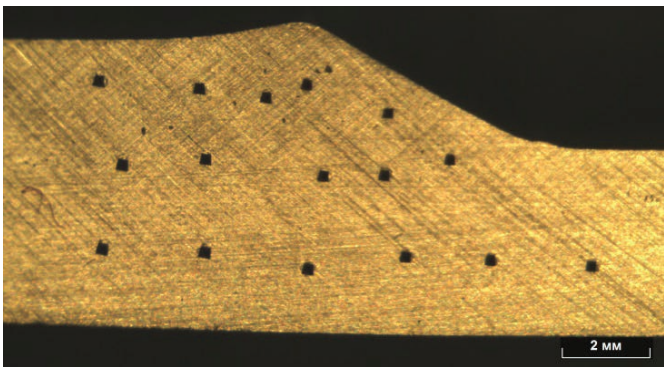
Fig. 8. The surface of the sample for hardness measuring

Полученные значения сопротивления деформации использованы для определения степенных зависимостей деформационного упрочнения (1), которые представлены в табл. 1 и 2. В качестве примера на рис. 10 показаны кривые упрочнения материала наружной поверхности заготовок, обработанных роликами с углами конусности 20 и 30°.

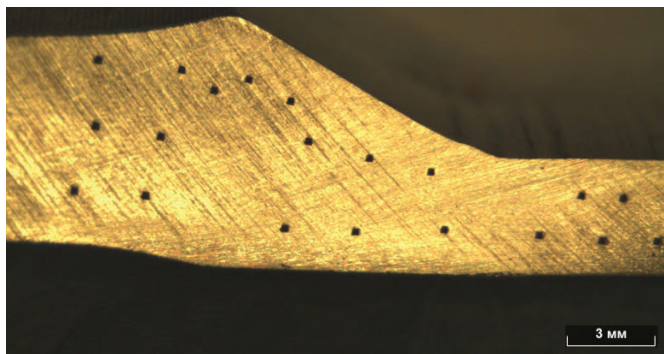
С практической точки зрения неравномерность распределения сопротивления деформации целесообразно оценивать между объемами материала, расположенными в непосредственной близости друг от друга. При этом значения сопротивления деформации в этих объемах должны максимально различаться между собой.



а



б



в

Рис. 9. Форма очага деформации при ротационной вытяжке и расположение отпечатков после измерений твердости на боковой поверхности образца:

а – $\alpha = 20^\circ$, $\varepsilon_{\Delta t} = 0,41$; б – $\alpha = 30^\circ$, $\varepsilon_{\Delta t} = 0,37$; в – $\alpha = 30^\circ$, $\varepsilon_{\Delta t} = 0,45$

Fig. 9. The shape of the deformation center of the flow forming and location of imprints after measuring the hardness on the side surface of the sample:

а – $\alpha = 20^\circ$, $\varepsilon_{\Delta t} = 0,41$; б – $\alpha = 30^\circ$, $\varepsilon_{\Delta t} = 0,37$; в – $\alpha = 30^\circ$, $\varepsilon_{\Delta t} = 0,45$

С учетом данных рекомендаций неравномерность распределения сопротивления деформации оценивалась коэффициентом

$$\delta_\sigma = \frac{\sigma_{S1}}{\sigma_{S2}}, \quad (6)$$

где δ_σ – коэффициент неравномерности распределения сопротивления деформации; σ_{S1} и σ_{S2} – сопротивление деформации материала соответственно на наружной поверхности и во внутренних объемах стенки заготовки.

Численные значения коэффициента δ_σ представлены в табл. 1 и 2.

Результаты и обсуждение

Использование метода внедрения индентора [25] позволило определить значения сопротивления деформации на наружной и внутренней поверхности заготовки после ротационной вытяжки, а также во внутренних объемах материала. Получена значительная неравномерность распределения сопротивления деформации по толщине стенки заготовки.

Наибольшие значения сопротивления деформации зафиксированы на наружной поверхности, обработанной роликом, а наименьшие значения – во внутренних объемах стенки заготовки. Численные значения зафиксированных параметров представлены в табл. 1 и 2. Данное распределение объясняется значительными деформациями сдвига на контактной поверхности ролика, вызванными силами трения. После обработки роликом с углом конусности $\alpha = 20^\circ$ на внутренней поверхности заготовки зафиксированы значения сопротивления деформации, незначительно превышающие сопротивление деформации во внутренних объемах стенки. После обработки роликом с углом конусности $\alpha = 30^\circ$ значения сопротивления деформации на внутренней поверхности и во внутренних объемах стенки заготовки практически равны. При этом с ростом угла α отмечается значительное увеличение наплыва перед роликом (рис. 9), что в целом способствует повышению неравномерности распределения сопротивления деформации.

Таким образом, наиболее опасной зоной, подверженной разрушению в процессе обработки, являются внутренние объемы материала, прилегающие к наружному поверхностному слою. Степенные зависимости деформационного упрочнения, полученные для различных зон исследуемого материала (табл. 1 и 2), соответствуют

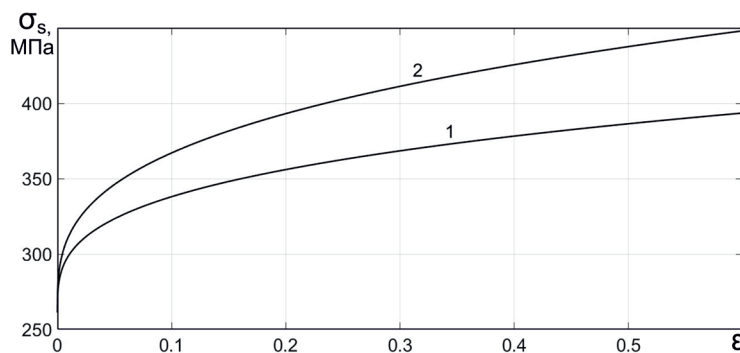


Рис. 10. Кривые деформационного упрочнения наружной поверхности заготовок, обработанных коническим роликом:

1 – при $\alpha = 20^\circ$; 2 – при $\alpha = 30^\circ$

Fig. 10. Curves of strain hardening of the outer surface of workpieces machined with a tapered roller:

1 – at $\alpha = 20^\circ$; 2 – at $\alpha = 30^\circ$

общему характеру изменения сопротивления деформации, т. е. с увеличением деформации интенсивность роста сопротивления деформации уменьшается (рис. 10).

Изменение угла конусности ролика оказывает самое сильное влияние на неравномерность распределения сопротивления деформации. С увеличением угла α сопротивление деформации материала растет более интенсивно на наружной поверхности, обработанной роликом. Например, интенсивность увеличения сопротивления деформации при угле конусности $\alpha = 30^\circ$ выше, чем при $\alpha = 20^\circ$ (рис. 10). Полученная зависимость при возрастании угла α объясняется, в частности, увеличением наплыва перед роликом (рис. 9) и ростом деформаций сдвига, вызванных силами трения на контактной поверхности.

Полученные результаты, связанные с неравномерностью распределения сопротивления деформации, соответствуют случаям обработки, когда назначенные технологические режимы ротационной вытяжки обеспечивают протекание процесса без макроразрушений [11]. При неверно выбранных технологических режимах характер распределения напряжений существенно изменяется, что приводит к разрушениям различного вида [5, 6].

Выводы

1. Способ определения сопротивления деформации материалов, представленный в работе [25], позволяет с точностью, достаточной для

инженерных расчетов, оценивать неравномерность распределения напряжений в заготовке при различных технологических режимах, что может быть использовано при проектировании процессов обработки давлением.

2. Процесс ротационной вытяжки характеризуется значительной неравномерностью распределения сопротивления деформации материала по толщине стенки заготовки, что необходимо учитывать при назначении технологических режимов обработки и геометрии деформирующего ролика.

3. При проектировании процессов ротационной вытяжки с утонением стенки значения степеней деформации и угла конусности ролика необходимо принимать в соответствии с рекомендациями работы [11], что позволит снизить неравномерность распределения напряжений и вероятность появления разрушения материала.

4. Предлагаемая методика определения неравномерности распределения напряжений может быть использована при разработке процессов обработки давлением и в проекторочных расчетах элементов конструкций.

Список литературы

1. Wong C.C., Dean T.A., Lin J. A review of spinning, shear forming and flow forming processes // International Journal of Machine Tools and Manufacture. – 2003. – Vol. 43. – P. 1419–1435. – DOI: 10.1016/S0890-6955(03)00172-X.
2. Haghshenas M., Klassen R.J. Mechanical characterization of flow formed FCC alloys // Materials Science and Engineering. – 2015. – Vol. 641. – P. 249–255. – DOI: 10.1016/j.msea.2015.06.046.
3. Bhatt R.J., Raval H.K. Investigation of effect of material properties on forces during flow forming process // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 173. – P. 1587–1594. – DOI: 10.1016/j.proeng.2016.12.265.
4. Яковлев С.С. Ковка и штамповка. В 4 т. Т. 4. Листовая штамповка: справочник. – М.: Машиностроение, 2010. – 732 с.
5. Davidson M.J., Balasubramanian K., Tagore G.R.N. An experimental study on the quality of flow-formed AA6061 tubes // Journal of Materials Processing Technology. – 2008. – Vol. 203, iss. 1–3. – P. 321–325. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.10.021.
6. Davidson M.J., Balasubramanian K., Tagore G.R.N. Surface roughness prediction of flow-

- formed AA6061 alloy by design of experiments // Journal of Materials Processing Technology. – 2008. – Vol. 202, iss. 1–3. – P. 41–46. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.08.065.
7. Microstructure and texture evolutions in AISI 1050 steel by flow forming / V. Bedekar, P. Pauskar, R. Shivpuri, J. Howe // Procedia Engineering. – 2017. – Vol. 81. – P. 2355–2360. – DOI: 10.1016/j.proeng.2014.10.333.
8. Marini D., Corney J. A methodology for assessing the feasibility of producing components by flow forming // Journal of Materials Processing Technology. – 2008. – Vol. 5, iss. 1. – P. 210–234. – DOI: 10.1080/21693277.2017.1374888.
9. Assessment of the surface topography of al 99.5 % tubular products formed by cold flow forming technology / S. Ekinovic, H. Dukic, I. Plancic, E. Begovica // Procedia Engineering. – 2005. – Vol. 132. – P. 389–396. – DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.510.
10. Wang X., Xia Q., Cheng X. Deformation behavior of haynes230 superalloy during backward flow forming // International Journal of Precision Engineering and Manufacturing. – 2017. – Vol. 18, iss. 1. – P. 77–83. – DOI: 10.1007/s12541-017-0009-4.
11. Udalov A.A., Parshin S.V., Udalov A.V. Theoretical investigation of the effect of the taper angle of the deforming roller on the limiting degrees of deformation in the process of flow forming // MATEC Web of Conferences. – 2018. – Vol. 224. – P. 01040. – DOI: 10.1051/mateconf/201822401040.
12. Udalov A.A., Parshin S.V., Udalov A.V. Influence of the profile radius of the deforming roller on the limit degree of deformation in the process of flow forming // Materials Science Forum. – 2019. – Vol. 946. – P. 800–806. – DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.946.800.
13. Udalov A.A., Parshin S.V., Udalov A.V. Mechanism for flow forming of cylindrical workpiece // Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering ICIE 2018. – S. l.: Springer Nature Switzerland AG, 2019. – P. 1811–1818. – (Lecture Notes in Mechanical Engineering). – DOI: 10.1007/978-3-319-95630-5_194.
14. Roy M.J., Klassen R.J., Wood J.T. Evolution of plastic strain during a flow forming process // Journal of Materials Processing Technology. – 2017. – Vol. 209, iss. 2. – P. 1018–1025. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2008.03.030.
15. Mohebbi M.S., Akbarzadeh A. Experimental study and FEM analysis of redundant strains in flow forming of tubes // Journal of Materials Processing Technology. – 2010. – Vol. 210, iss. 2. – P. 389–395. – DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2009.09.028.
16. Тарновский И.Я., Поздеев А.А., Ляшков В.Б. Деформация металла при прокатке. – Свердловск: Metallurgizdat, 1956. – 286 с.
17. Чекмарев А.П. Теория прокатки крупных слитков. – М.: Metallurgiya, 1968. – 252 с.
18. Смирнов-Аляев Г.А., Чикидовский В.П. Экспериментальные исследования в обработке металлов давлением. – Л.: Машиностроение, 1972. – 360 с.
19. Целиков А.И., Томленов А.Д., Зюзин В.И. Теория прокатки. – М.: Metallurgiya, 1982. – 335 с.
20. Parsa M.H., Pazooki A.M.A., Ahmadabadi M.N. Flow-forming and flow formability simulation // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. – 2009. – Vol. 42, iss. 5–6. – P. 463–473. – DOI: 10.1007/s00170-008-1624-0.
21. Singh A.K., Narasimhan K., Singh R. Finite element modeling of backward flow forming of Ti6Al4V alloy // Materials Today: Proceedings. – 2018. – Vol. 5, iss. 11. – P. 24963–24970. – DOI: 10.1016/j.matpr.2018.10.297.
22. Bhatt R.J., Raval H.K. Experimental study on flow forming process and its numerical validation // Materials Today: Proceedings. – 2018. – Vol. 5, iss. 2. – P. 7230–7239. – DOI: 10.1016/j.matpr.2017.11.390.
23. Bhatt R.J., Raval H.K. Influence of operating variables during flow forming process // Procedia CIRP. – 2016. – Vol. 55. – P. 146–151. – DOI: 10.1016/j.procir.2016.08.025.
24. Богатов А.А. Механические свойства и модели разрушения металлов. – Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2002. – 329 с. – ISBN 5-321-00276-2.
25. Удалов А.В., Паршин С.В., Удалов А.А. Определение сопротивления деформации металлов и сплавов методом внедрения индентора // Деформация и разрушение материалов. – 2019. – № 4. – С. 40–44. – DOI: 10.31044/1814-4632-2019-4-40-44.

Конфликт интересов

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

© 2019 Авторы. Издательство Новосибирского государственного технического университета. Эта статья доступна по лицензии Creative Commons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>)



Obrabotka metallov - Metal Working and Material Science

Journal homepage: http://journals.nstu.ru/obrabotka_metallov







Investigation of Changes in the Resistance to Deformation of Low-Carbon Steel in the Process of Flow Forming

Aleksandr Udalov^{1, a, *}, Andrey Udalov^{2, b}

¹ Vyatka State University, 36 Moskovskaya, Kirov, 610000, Russian Federation

² Ural Federal University named after the first President of Russia B.N. Yeltsin, 19 Mira st., Ekaterinburg, 620002, Russian Federation

^a  <https://orcid.org/0000-0003-0210-5423>,  a.v.udalov1960@gmail.com, ^b  <https://orcid.org/0000-0003-0886-3014>,  a.a.udalov1992@gmail.com

ARTICLE INFO

Article history:

Received: 28 April 2019

Revised: 16 May 2019

Accepted: 26 June 2019

Available online: 15 September 2019

Keywords:

Flow forming

Taper roller

Hardness

Deformation resistance

Hardening curve

ABSTRACT

Introduction. The main parameter that determines the efficiency and quality of the flow forming is the value and nature of the distribution of the material's deformation resistance over the wall thickness of the workpiece. In the technical literature, devoted to the study of this process, there is not enough information to correctly assign technological regimes and processing conditions. The work is devoted to an experimental study of changes in the resistance of deformation of low carbon steel in the process of flow forming, depending on the degree of deformation and the angle of taper of the deforming roller. **The aim of the work** is to determine the non-uniform distribution of the resistance of the deformation of low-carbon steel through the thickness of the wall of the workpiece after the flow forming depending on the degree of deformation and the angle of taper of the deforming roller. **Research methods.** The process of flow forming of blanks having an initial wall thickness of 6.5 mm and an outer diameter of 203 mm is carried out on a three-roller horizontal-rolling machine SRG-0.6-1500 using a direct method. Plastic shaping of the material of the blanks is carried out at different degrees of deformation on the mandrel with a diameter of 190 mm deforming rollers with a diameter of 260 mm with an angle of taper equal to 20° and 30°. The deformation resistance of the material through the wall thickness is determined on longitudinal specimens cut from machined blanks using the indenter insertion method and measuring the hardness with a Vickers tip. The uneven distribution of the strain resistance is estimated by a coefficient defined as the ratio of the resistance of the deformation of the outer surface to the resistance of the deformation of the internal volumes of the wall of the workpiece. **Results and discussion.** The highest values of strain resistance are obtained on the outer surface of the workpieces treated with a roller, and the smallest values are recorded in the internal volume of the wall of the workpieces. The estimation of the non-uniformity of the distribution of the deformation resistance over the wall thickness of the workpiece is made using an irregularity coefficient equal to the ratio of the deformation resistances of the outer layer and the internal volumes of the wall of the workpiece. It is revealed that the most dangerous zones subjected to destruction in the process of rotational drawing are the internal volumes of the material adjacent to the outer surface layer of the workpiece. It is established that the non-uniformity coefficient of stress distribution when processing with a roller with a taper angle $\alpha = 30^\circ$ is about 10% more than with a taper angle $\alpha = 20^\circ$. With an increase in the degree of deformation, the coefficient of uneven distribution of stresses increases, but very slightly. The resulting patterns are explained, in particular, by the influx that forms in front of the roller. According to the results obtained, general recommendations are given on the purpose of the degree of deformation and the angle of taper of the roller when performing the flow forming. In addition, the empirical dependences of the strain hardening of the material for different volumes of the workpiece are obtained. The proposed method for determining the uneven distribution of stresses can be used in the development of pressure treatment processes and in the design calculations of structural elements.

For citation: Udalov A.V., Udalov A.A. Investigation of changes in the resistance to deformation of low-carbon steel in the process of flow forming. *Obrabotka metallov (tekhnologiya, oborudovanie, instrumenty) = Metal Working and Material Science*, 2019, vol. 21, no. 3, pp. 59–71. DOI: 10.17212/1994-6309-2019-21.3-59-71. (In Russian).

* Corresponding author

Udalov Aleksandr V., Ph.D. (Engineering), Associate Professor

Vyatka State University,

36 Moskovskaya st.,

610000, Kirov, Russian Federation

Tel.: +7 (922) 930-72-45, e-mail: a.v.udalov1960@gmail.com

References

1. Wong C.C., Dean T.A., Lin J. A review of spinning, shear forming and flow forming processes. *International Journal of Machine Tools and Manufacture*, 2003, vol. 43, pp. 1419–1435. DOI: 10.1016/S0890-6955(03)00172-X.
2. Haghshenas M., Klassen R.J. Mechanical characterization of flow formed FCC alloys. *Materials Science and Engineering*, 2015, vol. 641, pp. 249–255. DOI: 10.1016/j.msea.2015.06.046.
3. Bhatt R.J., Raval H.K. Investigation of effect of material properties on forces during flow forming process. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 173, pp. 1587–1594. DOI: 10.1016/j.proeng.2016.12.265.
4. Yakovlev S.S. *Kovka i shtampovka*. V 4 t. T. 4. *Listovaya shtampovka* [Forging and stamping. In 4 vol. Vol. 4. Sheet stamping]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2010. 732 p.
5. Davidson M.J., Balasubramanian K., Tagorea G.R.N. An experimental study on the quality of flow-formed AA6061 tubes. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, vol. 203, iss. 1–3, pp. 321–325. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.10.021.
6. Davidson M.J., Balasubramanian K., Tagorea G.R.N. Surface roughness prediction of flow-formed AA6061 alloy by design of experiments. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, vol. 202, iss. 1–3, pp. 41–46. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2007.08.065.
7. Bedekar V., Pauskar P., Shivpuri R., Howe J. Microstructure and texture evolutions in AISI 1050 steel by flow forming. *Procedia Engineering*, 2017, vol. 81, pp. 2355–2360. DOI: 10.1016/j.proeng.2014.10.333.
8. Marini D., Corney J. A methodology for assessing the feasibility of producing components by flow forming. *Journal of Materials Processing Technology*, 2008, vol. 5, iss. 1, pp. 210–234. DOI: 10.1080/21693277.2017.1374888.
9. Ekinovic S., Dukic H., Plancic I., Begovica E. Assessment of the surface topography of al 99.5% tubular products formed by cold flow forming technology. *Procedia Engineering*, 2015, vol. 132, pp. 389–396. DOI: 10.1016/j.proeng.2015.12.510.
10. Wang X., Xia Q., Cheng X. Deformation behavior of haynes230 superalloy during backward flow forming. *International Journal of Precision Engineering and Manufacturing*, 2017, vol. 18, iss. 1, pp. 77–83. DOI: 10.1007/s12541-017-0009-4.
11. Udalov A.A., Parshin S.V., Udalov A.V. Theoretical investigation of the effect of the taper angle of the deforming roller on the limiting degrees of deformation in the process of flow forming. *MATEC Web of Conferences*, 2018, vol. 224, p. 01040. DOI: 10.1051/mateconf/201822401040.
12. Udalov A.A., Parshin S.V., Udalov A.V. Influence of the profile radius of the deforming roller on the limit degree of deformation in the process of flow forming. *Materials Science Forum*, 2019, vol. 946, pp. 800–806. DOI: 10.4028/www.scientific.net/msf.946.800.
13. Udalov A.A., Parshin S.V., Udalov A.V. Mechanism for flow forming of cylindrical workpiece. *Proceedings of the 4th International Conference on Industrial Engineering. Lecture Notes in Mechanical Engineering*, Springer Nature Switzerland AG, 2019, pp. 1811–1818. DOI: 10.1007/978-3-319-95630-5_194.
14. Roy M.J., Klassen R.J., Wood J.T. Evolution of plastic strain during a flow forming process. *Journal of Materials Processing Technology*, 2017, vol. 209, iss. 2, pp. 1018–1025. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2008.03.030.
15. Mohebbi M.S., Akbarzadeh A. Experimental study and FEM analysis of redundant strains in flow forming of tubes. *Journal of Materials Processing Technology*, 2010, vol. 210, iss. 2, pp. 389–395. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2009.09.028.
16. Tarnovskii I.Ya., Pozdeev A.A., Lyashkov V.B. *Deformatsiya metalla pri prokatke* [Metal deformation during rolling]. Sverdlovsk, Metallurgizdat Publ., 1956. 286 p.
17. Chekmarev A.P. *Teoriya prokatki krupnykh slitkov* [Theory of rolling large ingots]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1968. 252 p.
18. Smirnov-Alyayev G.A., Chikidovskii V.P. *Eksperimental'nye issledovaniya v obrabotke metallov davleniem* [Experimental studies in metal forming]. Leningrad, Mashinostroenie Publ., 1972. 360 p.
19. Tselikov A.I., Tomlenov A.D., Zyuzin V.I. *Teoriya prokatki* [Theory of rolling]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1982. 335 p.
20. Parsa M.H., Pazooki A.M.A., Ahmadabadi M.N. Flow-forming and flow formability simulation. *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*, 2009, vol. 42, iss. 5–6, pp. 463–473. DOI: 10.1007/s00170-008-1624-0.



21. Singh A.K., Narasimhan K., Singh R. Finite element modeling of backward flow forming of Ti6Al4V alloy. *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5, iss. 11, pp. 24963–24970. DOI: 10.1007/s00170-008-1624-0.
22. Bhatt R.J., Raval H.K. Experimental study on flow forming process and its numerical validation. *Materials Today: Proceedings*, 2018, vol. 5, iss. 2, pp. 7230–7239. DOI: 10.1016/j.matpr.2018.10.297.
23. Bhatt R.J., Raval H.K. Influence of operating variables during flow forming process. *Procedia CIRP*, 2016, vol. 55, pp. 146–151. DOI: 10.1016/j.procir.2016.08.025.
24. Bogatov A.A. *Mekhanicheskie svoistva i modeli razrusheniya metallov* [Mechanical properties and models of metals destruction]. Ekaterinburg, UGTU-UPI Publ., 2002. 329 p. ISBN 5-321-00276-2.
25. Udalov A.V., Parshin S.V., Udalov A.A. Opređenje soprotivleniya deformatsii metallov i splavov metodom vnedreniya indentora [Determination of deformation resistance of metals and alloys by indentation method]. *Deformatsiya i razrushenie materialov = Deformation and Fracture of Materials*, 2019, no. 4, pp. 40–44. DOI: 10.31044/1814-4632-2019-4-40-44.

Conflicts of Interest

The authors declare no conflict of interest.

© 2019 The Authors. Published by Novosibirsk State Technical University. This is an open access article under the CC BY license (<http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>).