

УДК 621.7.016.2-412:669.715

Скрябин С. А.
Чайка Д. С.**ОПРЕДЕЛЕНИЕ ТЕМПЕРАТУРНОГО КОЭФФИЦИЕНТА УШИРЕНИЯ ПРИ
ВАЛЬЦОВКЕ ЗАГОТОВОК ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В УСЛОВИЯХ
ПРИБЛИЖЕННЫХ К ИЗОТЕРМИЧЕСКИМ**

Актуальность разработки и внедрения малоотходных технологических процессов штамповки поковок из алюминиевых сплавов на промышленных предприятиях, обусловлена значительным применением в изделиях отрасли этих сплавов, повышенным расходом металла, высокой трудоемкостью, длительным циклом изготовления качественных штампованных поковок и задачами по совершенствованию металлосберегающих технологий [1–4].

Применение процесса вальцовки заготовок в условиях изотермического и приближенного к нему деформирования, дает возможность максимально использовать эффект сверхпластичности: изготавливать поковки за одну штамповку, снизить трудоемкость их изготовления за счет снятия промежуточных операций нагрева, обрезки облоя, травления, зачистки; снизить усилие деформирования за счет повышения пластичности обрабатываемого металла, которое происходит из – за полного протекания разупрочняющих процессов; обеспечить хорошую и всестороннюю проработку структуры, и снизить разброс свойств в объеме заготовки.

Целью данной работы является дальнейшее развитие исследований проведенных д. т. н. С. А. Скрябиным [5, 6], которое заключается в проведении дополнительных расчетно-теоретических исследований влияния степени деформации и температуры нагрева вальцовочных штампов на технологические параметры процесса вальцовки.

Анализ экспериментальных данных приведенных на рис. 1, показал, что разница в значениях уширения полученная при вальцовке заготовок в вальцовочных штампах, имеющих температуру 20 °С и нагретыми до температур 250÷350 °С (интервал, характеризующийся постоянством значений уширения) составляет для любой степени деформации заготовки в исследуемой области (10–80 %) величину, определяемую по формуле:

$$\frac{\Delta b_{20}}{b_0} - \frac{\Delta b_{350}}{b_0} = \frac{\Delta h}{h_0} \cdot (tg\alpha - tg\alpha_1), \quad (1)$$

где $\Delta h = h_0 - h_1$ – абсолютное обжатие, мм; h_0, b_0 – высота и ширина исходной заготовки, мм; $\Delta b_{20}, \Delta b_{350}$ – уширение, получаемое при вальцовке заготовок в вальцовочных штампах, имеющих температуру 20 °С и 250÷350 °С соответственно, мм; $tg\alpha, tg\alpha_1$ – углы наклона, определяющие зависимость уширения от степени деформации при вальцовке в штампах, имеющих температуру 20 °С и 250÷350 °С.

Для круглой заготовки $b_0 = h_0$, тогда:

$$\Delta b_{20} - \Delta b_{350} = \Delta h \cdot (tg\alpha - tg\alpha_1) = \Delta h \cdot K_{yш}^u, \quad (2)$$

где $K_{yш}^u$ – температурный коэффициент уширения, зависящий от температуры нагрева вальцовочных штампов; $\Delta h \cdot K_{yш}^u$ – значение, определяющее разницу между уширением, полученным изотермической и традиционной вальцовками.

Степень обжатия по высоте определялась отношением:

$$\varepsilon = (F_{см} / F_{исх}) \cdot 100\%, \quad (3)$$

где $F_{см}$ – смещенная по высоте площадь поперечного сечения; $F_{исх}$ – площадь поперечного сечения исходной заготовки.

Таким образом, при вальцовке заготовок из алюминиевых сплавов в гладких валках и в калибрах, температурный коэффициент уширения рекомендуется определять по формуле:

$$K_{уш}^u = \frac{\Delta b_{20} - \Delta b_{350}}{\Delta h} \quad (4)$$

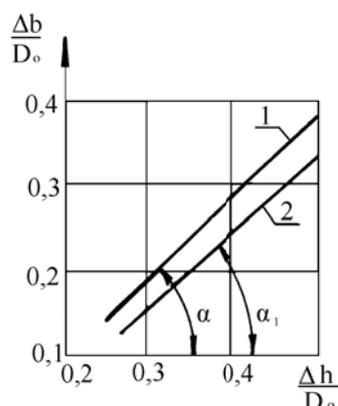


Рис. 1. Зависимость уширения от степени деформации при вальцовке заготовок круглого сечения в гладких валках, имеющих температуру:

1 – 20 °С; 2 – 250÷350 °С

Для определения расчетных зависимостей температурного коэффициента уширения от степени деформации, в данной работе применялась программа для моделирования технологии объемной штамповки «QForm». Для расчета, в программу вводились данные для моделирования процесса вальцовки: материал заготовок – алюминиевый сплав АК6, температура валков 20°С и 350°С, температура нагрева заготовок – 450°С, коэффициент трения $\mu = 0,35$. Величина температурного коэффициента уширения определялось при прокатке заготовок со степенями деформации $\varepsilon = 10\div 80\%$ по следующим схемам вальцовки:

- прокатка в гладких валках $\varnothing 260$ мм, с частотой вращения 26 мин⁻¹ (рис. 2, а) прямоугольных заготовок с различной формой внеконтактных зон (рис. 3). Расчеты были проведены как продолжение исследований, приведенных в работе [7].

- прокатка в гладких валках $\varnothing 260$ мм, с частотой вращения 26 мин⁻¹ цилиндрических заготовок с размерами $\varnothing 20, 25, 30, 35, 40 \times 150$ мм (рис. 2, б). Расчеты были проведены по схеме уже использовавшейся для исследования влияния внеконтактных зон на уширение [8].

- вальцовка цилиндрических заготовок размерами $\varnothing 25, 35, 50, 65 \times 200$ мм в овальных калибрах вальцовочных секторов с диаметром валков $\varnothing 320$ мм и частотой вращения 65 мин⁻¹ (рис. 2, в).

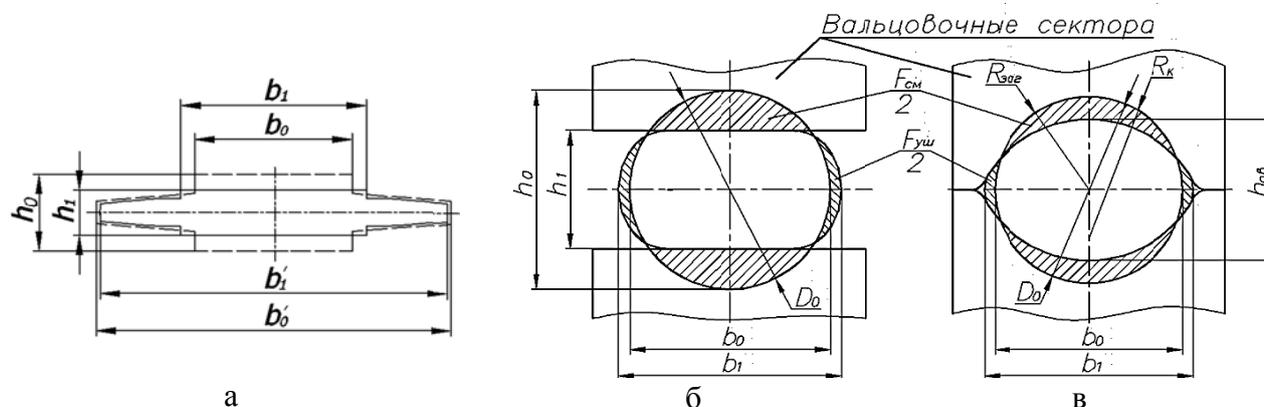


Рис. 2. Схемы для определения размеров при вальцовке образцов прямоугольного сечения с различной формой ВЗ в гладких валках (а), цилиндрического сечения в гладких валках (б) и цилиндрического сечения в овальных калибрах (в)

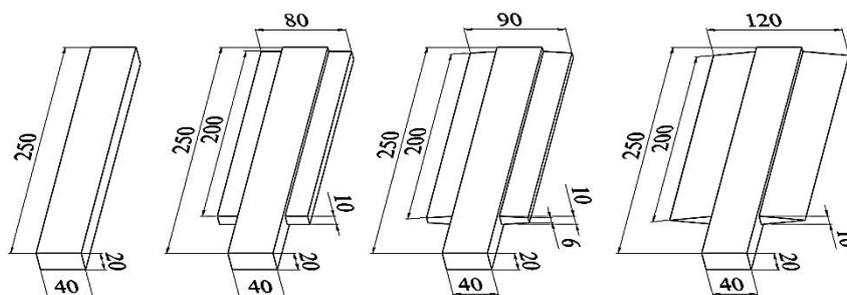


Рис. 3. Образцы для определения влияния ВЗ на температурный коэффициент уширения при вальцовке прямоугольных заготовок в гладких валках

Результаты расчетов, показали идентичное поведение температурного коэффициента уширения для всех форма ВЗ при прокатке прямоугольных заготовок в гладких валках, а также для всех диаметров заготовок при вальцовке в гладких валках и калибрах. Качественную характеристику степени линейной зависимости между показателями температурного коэффициента уширения дает коэффициент корреляции ρ [11] – статистическая мера совпадения (взаимосвязь) показателей температурного коэффициента уширения разных заготовок при соответствующих степенях деформации. Средний коэффициент корреляции для всех трех случаев составил $0,9 \leq \rho < 1$. Высокий средний коэффициент корреляции означают малую величину отклонения величины температурного коэффициента уширения для всех диаметров при одинаковых степенях деформации.

Расчетные данные показали, что при вальцовке прямоугольных заготовок с различными формами ВЗ в гладких валках температурный коэффициент уширения будет одинаковый для всех заготовок (рис. 3) и не зависит от формы внеконтактной зоны. Это позволяет вывести единую для всех прямоугольных заготовок зависимость усредненного температурного коэффициента уширения $K_{уш. гл. пр.}^u$ от абсолютной степени обжатия $\varepsilon = F_{см} / F_{исх}$ (рис. 4). График зависимости определяется с помощью уже использовавшейся формулы регрессии [1, 9]. Вывод коэффициентов в формуле производится по методам нелинейного оценивания с помощью программного пакета для статистической обработки данных Statistika 6.1 [10]:

$$K_{уш. гл. пр.}^u = \sqrt{0,892453 \cdot \varepsilon^2 - 1,695 \cdot \varepsilon + 0,809485} + 0,945866 \cdot \varepsilon - 0,89859 \quad (5)$$

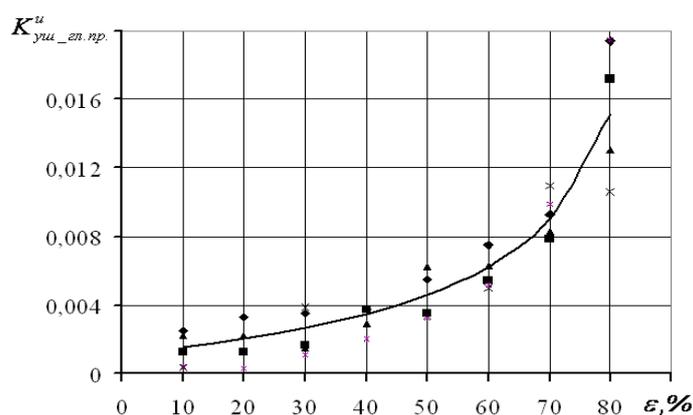


Рис. 4. Зависимость температурного коэффициента уширения $K_{уш. гл. пр.}^u$ от степени деформации при вальцовке заготовок прямоугольного сечения (рис. 2) в гладких валках:

◆ – без ВЗ; ■ – прямоугольная ВЗ; ▲ – трапецидальная ВЗ; * – треугольная ВЗ

При вальцовке цилиндрических заготовок в гладких валках, результаты расчетов, показали идентичное поведение температурного коэффициента уширения для всех диаметров заготовок (рис. 2, б). Зависимость усредненного температурного коэффициента уширения

$K_{\text{уш. гл.кр.}}^u$ от абсолютной степени обжатия $\varepsilon = F_{\text{см}}/F_{\text{исх}}$ (рис. 5), может представлять собой один график для всех диаметров цилиндрических заготовок. Для подбора модели аппроксимации и параметров графика зависимости, была использована программа для статистической обработки данных Statistika 6.1. Наиболее подходящей формулой для построения графика оказалась нелинейная регрессия [10]:

$$K_{\text{уш. гл.кр.}}^u = \sqrt{0,409533 \cdot \varepsilon^2 + 0,861813 \cdot \varepsilon + 0,561892} - 0,5574 \cdot \varepsilon - 0,74744 \quad (6)$$

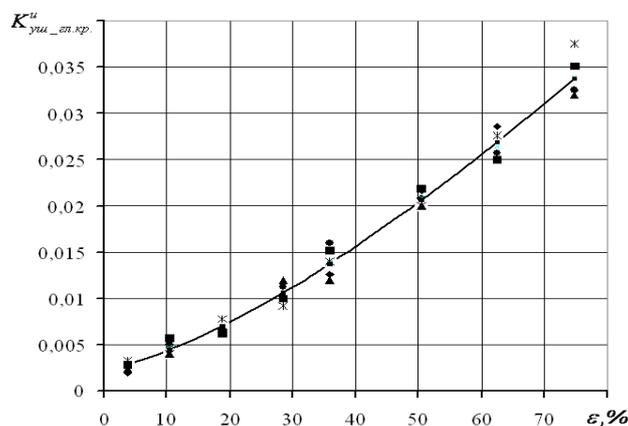


Рис. 5. Зависимость температурного коэффициента уширения $K_{\text{уш. гл.кр.}}^u$ от степени деформации и диаметра заготовки D_0 при вальцовке заготовок круглого сечения в гладких валках:

◆ – $D_0 = 20$ мм; ▲ – $D_0 = 25$ мм; * – $D_0 = 30$ мм; ■ – $D_0 = 35$ мм; ● – $D_0 = 40$ мм

При вальцовке цилиндрических заготовок в овальных калибрах (рис. 2, в), построение по результатам расчетов точек данных температурного коэффициента уширения для соответствующих степеней деформации, показало высокую степень корреляции значений для всех диаметров заготовок. Это позволяет построить усредненный график зависимости для всех исследуемых диаметров цилиндрических заготовок (рис. 6). Коэффициенты для аппроксимации усредненной зависимости в используемой модели нелинейной регрессии [9] определялись с помощью программы Statistika 6.1:

$$K_{\text{уш. ов}}^u = \sqrt{2,72374 \cdot \varepsilon^2 - 2,1479 \cdot \varepsilon + 0,424271} + 1,71577 \cdot \varepsilon - 0,65091 \quad (6)$$

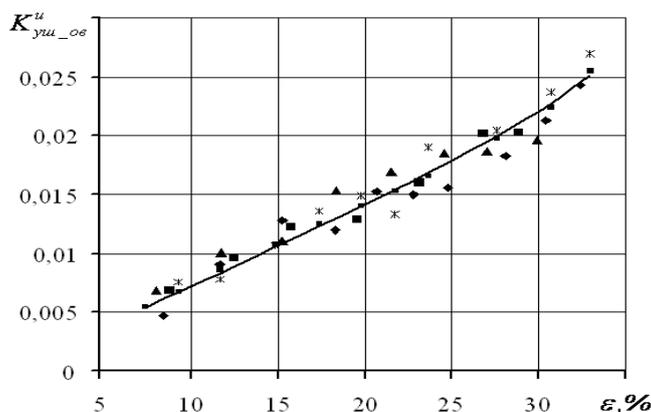


Рис. 6. Зависимость температурного коэффициента уширения $K_{\text{уш. ов}}^u$ от степени деформации и диаметра заготовки D_0 при вальцовке цилиндрических заготовок в гладких валках:

* – $D_0 = 65$ мм; ◆ – $D_0 = 50$ мм; ▲ – $D_0 = 35$ мм; ■ – $D_0 = 25$ мм.

Проведенный анализ изменений уширения показал, что при использовании изотермических условий деформирования, значения температурного коэффициента уширения увеличиваются. Так, значения коэффициента, полученные при температуре нагрева вальцовочных штампов до $t_B = 350^0 C$, с ростом степени деформации с $\varepsilon = 5\%$ до $\varepsilon = 75\%$, увеличивается на 70% для прямоугольных заготовок (рис. 4) и на 85% для цилиндрических заготовок (рис. 5). Это говорит о том, что наиболее существенными факторами, влияющими на уширение в процессе вальцовки заготовок в гладких валках, и являются степень деформации.

В отличие от вальцовки в гладких валках, при вальцовке в овальных калибрах, сильное влияние на перемещение металла в очаге деформации, оказывает существующая неравномерность деформации по ширине и высоте заготовки, вызванная кривизной овального калибра в поперечном сечении. Поэтому, для вальцовки цилиндрических заготовок в овальных калибрах, температурный коэффициент уширения увеличивается на 80%, при увеличении степени деформации с $\varepsilon = 5\%$ до $\varepsilon = 35\%$ (рис. 6), что соответствует кривизне овального калибра $i = 3 \div 4$ для разных диаметров заготовок.

Снижение уширения при вальцовке в условиях деформирования приближенным к изотермическим, происходит за счет увеличения осевых сжимающих напряжений направленных вдоль очага деформации, более полного протекания разупрочняющих процессов, отсутствия зон затрудненной деформации. Это подтверждается графиками сравнительным анализом зависимостей температуры заготовки в конце очага деформации от степени деформации, при вальцовке цилиндрических заготовок в овальных калибрах (рис. 7). При вальцовке с заготовок в холодных вальцовочных секторах (а), температура заготовки в месте контакта с инструментом (рис. 6, а, 3) – значительно ниже температуры заготовки в очаге деформации (рис. 6, а, 1) и в середине заготовки (рис. 6, а, 2). При вальцовке в условиях, приближенных к изотермическим, температура выравнивается по всему сечению заготовки (рис. 6, б), соответственно снижаются напряжения по всему сечению, и выравнивается неравномерность деформации. При этом температура заготовки во внеконтактных зонах становится выше температуры в месте контакта заготовки с инструментом, это говорит о более высокой скорости деформации во внеконтактных зонах, что способствует уменьшению уширения.

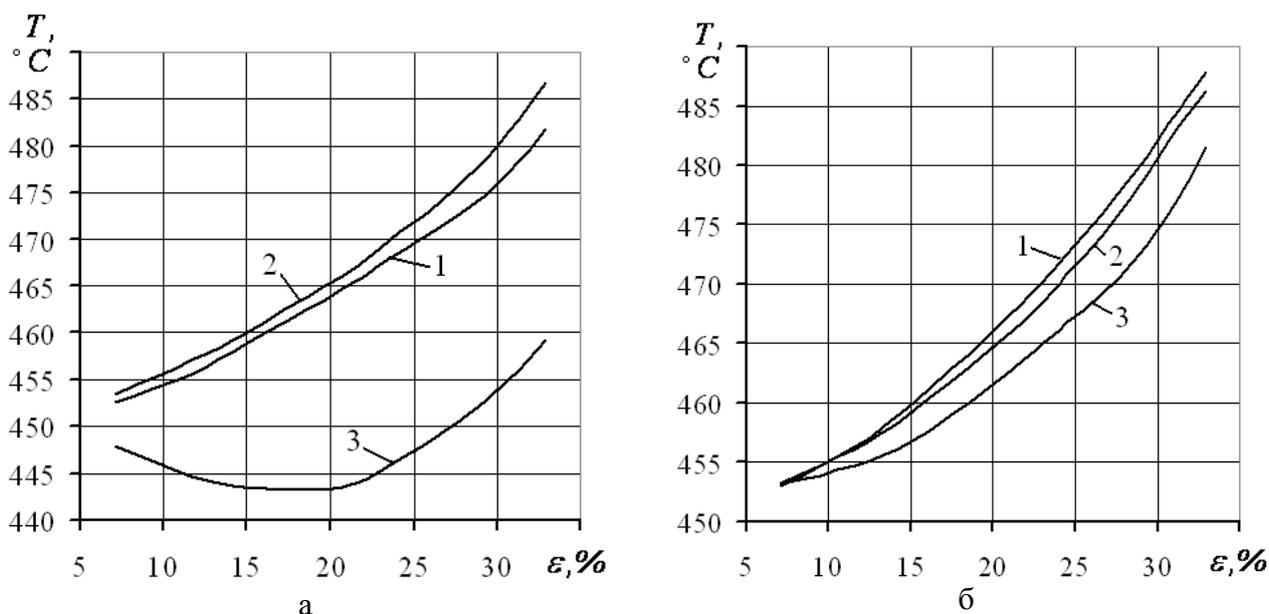


Рис. 7. Зависимости температуры заготовки в конце очага деформации, при вальцовке цилиндрических заготовок в овальных калибрах, в обычных условиях (а) и в условиях приближенных к изотермическим (б):

1 – во внеконтактной зоне; 2 – в середине заготовки; 3 – в месте контакта заготовки с инструментом

На основании формул для расчета уширения при традиционной вальцовке [1], выводится математическая модель для расчета уширения при вальцовке заготовок из алюминиевых сплавов в условиях приближенных к изотермическим, в которую входит температурный коэффициент уширения [6]. Для практического расчета вальцовки цилиндрических заготовок в овальных калибрах:

$$\Delta b = K_{уш}^{ов} \cdot \sqrt{(d - h_{ов}) \cdot \frac{D_{к}^{ов}}{2} \cdot \left(\frac{d - h_{ов}}{d} \right)} - (d - h_{ов}) \cdot K_{уш-ов}^u \quad (7)$$

где $K_{уш}^{ов}$ – коэффициент, учитывающий влияние на уширение неравномерности деформации по ширине и высоте заготовки в зависимости от кривизны овального калибра [1];

$(d - h_{ов}) \cdot K_{уш-ов}^u$ – выражение, определяющее разницу между уширением, полученным изотермической и традиционной вальцовками.

Из формулы (7) видно, что для одинаковых степеней деформации ε , величина разницы в уширении зависит от диаметра заготовки и высоты калибра и увеличивается по мере роста диаметра вальцуемой заготовки.

ВЫВОДЫ

Для теоретического исследования температурного коэффициента уширения, проведено компьютерное моделирование процесса вальцовки с применением программы «QForm». Исследования проводились на прямоугольных и цилиндрических образцах из алюминиевого сплава АК6, при вальцовке в гладких валках и овальных калибрах со степенью деформации $\varepsilon = 5 \div 80 \%$.

Вальцовку заготовок из алюминиевых сплавов, в условиях приближенных к изотермическим, рекомендуется проводить в вальцовочных секторах, нагретых до температур 250–350 °С, при которых значения величин уширения постоянны.

Установлено, что с увеличением степени деформации в интервале температур нагрева вальцовочных штампов 250–350 °С, растет величина температурного коэффициента уширения $K_{уш}^u$.

Погрешность расчетных данных температурного коэффициента уширения $K_{уш}^u$ не превышает 10 %, что свидетельствует о допустимости полученных данных для практического применения.

Для расчетов величины температурного коэффициента уширения $K_{уш}^u$, были выведены формулы зависимости $K_{уш}^u$ от степени деформации $\varepsilon = F_{см} / F_{исх}$.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Скрябин С. А. *Технология горячего деформирования заготовок из алюминиевых сплавов на ковочных вальцах* / С. А. Скрябин – Винница : О. Власюк, 2007. – 284 с.
2. Скрябин С. А. *Применение процесса вальцовки и подготовительных ручьев при изготовлении горячим деформированием штампованных поковок из алюминиевых сплавов с вытянутой осью и закрытыми сечениями* / С. А. Скрябин, В. Н. Полохов, К. С. Скрябин // *Технологические системы*. – 2003. – № 4. – С. 32–37.
3. Скрябин С. А. *Применение процесса вальцовки и подготовительных ручьев при изготовлении горячим деформированием штампованных поковок из алюминиевых сплавов, имеющих вытянутую ось с отростками* / С. А. Скрябин, В. Н. Полохов, К. С. Скрябин // *Технологические системы*. – 2004. – № 3. – С. 29–32.
4. Скрябин С. А. *Штамповка поковок из алюминиевых сплавов с вытянутой осью, тонким полотном, закрытыми сечениями и глубокой полостью* / С. А. Скрябин, В. Н. Полохов, К. С. Скрябин // *Технологические системы*. – 2006. – № 1. – С. 30–35.
5. Скрябин С. А. *Исследование термомеханических параметров вальцовки заготовок в изотермических условиях* / С. А. Скрябин – К. : Вестник национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт». *Машиностроение*. – 1998, вып. 33. – С. 311–317.
6. Скрябин С. А. *Вальцовка заготовок из алюминиевых сплавов в условиях изотермического и приближенного к нему деформирования* / С. А. Скрябин, И. В. Гунько, Л. В. Швець. – Винница : ПП «Едельвейс і К», – 2010. – 136 с.

7. Скрябин С.А. Влияние формы и размеров внеконтактных зон вальцуемых заготовок на уширение / С. А. Скрябин, Д. С. Чайка // *Вестник национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт»*. – 2007. – № 50. – С. 192–199.
8. Скрябин С. А. Влияние внеконтактных зон на уширение при вальцовке цилиндрических заготовок в гладких валках / С. А. Скрябин, В. Л. Калюжный, Д. С. Чайка // *Вісник Донбаської державної машинобудівної академії: збірник наукових праць*. – Краматорськ : ДДМА, 2008. – № 3Е (14). – С. 147–155.
9. Скрябин С. А. Исследование методов аппроксимации зависимостей коэффициентов уширения и опережения при вальцовке в калибрах / С. А. Скрябин, Д. С. Чайка // *Обработка материалов давлением : сборник научных трудов*. – Краматорск : ДГМА, 2013. – № 3 (36). – С. 64–67.
10. Вуколов Э. А. Основы статистического анализа Практикум по статистическим методам и исследованию операций с использованием пакетов STATISTIKA и EXCEL: учебное пособие. – 2-е изд., испр. и доп. / Э. А. Вуколов – М. : ФОРУМ, 2008. – 464 с. – (Высшее образование).
11. Красовский Г.И. Планирование эксперимента / Г. И. Красовский, Г. В. Филаретов. – Мн. : Изд-во БГУ, 1982. – 302 с., ил.

REFERENCES

1. Skryabin S. A. Tehnologija gorjachego deformirovanija zagotovok iz aljuminievyh splavov na kovochnyh val'cah / S. A. Skryabin – Vinnica : O. Vlasjuk, 2007. – 284 s.
2. Skryabin S. A. Primenenie processa val'covki i podgotovitel'nyh ruch'ev pri izgotovlenii gorja-chim deformirovaniem shtampovannyh pokovok iz aljuminievyh splavov s vytjanutoj os'ju i zakrytymi seche-nijami / S. A. Skryabin, V. N. Polohov, K. S. Skryabin // *Tehnologicheskie sistemy*. – 2003. – № 4. – S. 32–37.
3. Skryabin S. A. Primenenie processa val'covki i podgotovitel'nyh ruch'ev pri izgotovlenii gorja-chim deformirovaniem shtampovannyh pokovok iz aljuminievyh splavov, imejushhих vytjanutuju os' s otrost-kami / S. A. Skryabin, V. N. Polohov, K. S. Skryabin // *Tehnologicheskie sistemy*. – 2004. – № 3. – S. 29–32.
4. Skryabin S. A. Shtampovka pokovok iz aljuminievyh splavov s vytjanutoj os'ju, tonkim polotnom, zakrytymi sechenijami i glubokoj polost'ju / S. A. Skryabin, V. N. Polohov, K. S. Skryabin // *Tehnologicheskie sistemy*. – 2006. – № 1. – S. 30–35.
5. Skryabin S. A. Issledovanie termomechanicheskikh parametrov val'covki zagotovok v izotermicheskih uslovijah / S. A. Skryabin – K. : Vestnik nacional'nogo tehničeskogo universiteta Ukrainy «Kievskij politehničeskij institut». *Mashinostroenie*. – 1998, vyp. 33. – S. 311 – 317.
6. Skryabin S. A. Val'covka zagotovok iz aljuminievyh splavov v uslovijah izotermičeskogo i pribli-zhennogo k nemu deformirovanija / S. A. Skryabin, I. V. Gun'ko, L. V. Shvec. – Vinnica : PP «Edel'vejs i K»,. – 2010. – 136 s.
7. Skryabin S. A. Vlijanie formy i razmerov vnekontaktnyh zon val'cuemyh zagotovok na ushirenie / S. A. Skryabin, D. S. Chajka // *Vestnik nacional'nogo tehničeskogo universiteta Ukrainy «Kiev-skij politehničeskij institut»*. – 2007. – № 50. – S. 192–199.
8. Skryabin S. A. Vlijanie vnekontaktnyh zon na ushirenie pri val'covke cilindricheskikh zagotovok v gladkih valkah / S. A. Skryabin, V. L. Kaljuzhnyj, D. S. Chajka // *Visnik Donbas'koї derzhavnoї mashinobudivnoї akademii: zbirnik naukovih prac'*. – Kramators'k : DDMA, 2008. – № 3E (14). – S. 147–155.
9. Skryabin S. A. Issledovanie metodov approksimacii zavisimostej koeficientov ushirenija i operezhenija pri val'covke v kalibrah / S. A. Skryabin, D. S. Chajka // *Obrabotka materialov davleniem : sbornik nauchnyh trudov*. – Kramatorsk : DGMA, 2013. – № 3 (36). – S. 64–67.
10. Vukolov Je. A. Osnovy statističeskogo analiza Praktikum po statističeskim metodam i issle-dovaniju operacij s ispol'zovaniem paketov STATISTIKA i EXCEL: uchebnoe posobie. – 2-e izd., ispr. i dop. / Je. A. Vukolov – M. : FORUM, 2008. – 464 s. – (Vysshee obrazovanie).
11. Krasovskij G.I. Planirovanie jeksperimenta / G. I. Krasovskij, G. V. Filaretov. – Mн. : Iz-dvo BГУ, 1982. – 302 s., il.

Скрябин С. А. – д-р техн. наук, проф. ВНАУ

Чайка Д. С. – аспирант ВНАУ

ВНАУ – Винницкий Национальный Аграрный Университет, г. Винница.

E-mail: scriabin_sa@mail.ru; chaika_ds@mail.ru