

України "КП". Серія: "Машиностроение" – 2010 – №60. – С. 133-137. 6. Грушко О.В. Особливості товстолистового штампування за схемою згину та зсуву / О.В. Грушко, Т.І. Молодецька // Вісник НТУУ «КПІ». Машинобудування. – 2011. – №62. – С.193-197. 7. Новик Ф.С. Оптимизация процессов технологии металлов методами планирования экспериментов / Ф.С. Новик, Я.Б. Арсов. – М.: Машиностроение; София: Техника, 1980. – 304 с.

Надійшла до редколегії 23.10.2012

УДК 621.77.014

**Метод эквивалентной оценки энергосиловых параметров процессов пластического формоизменения / Грушко А. В.** // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – №47(953). – С. 14–23. – Бібліогр.:7 назв.

Метод еквівалентної оцінки силових характеристик процесів обробки тиском дозволяє розрахувати деформуючу силу для натурального матеріалу на основі даних силових характеристик для двох модельних матеріалів за відомими кривими течіями. Криві течії в методі апроксимовані степеневою функцією за Людвігом. Перевірку запропонованого методу здійснювали зіпівставленням з теоретичними рішеннями і моделювання методом кінцевих елементів різних процесів обробки тиску.

**Ключові слова:** силові характеристики, метод кінцевих елементів, модельний матеріал, натурний матеріал, степенева функція, крива течії

The method of equivalent grade of power parameters of pressure processes allows us to calculate the pressure deforming force for natural materials based on force characteristics for the two model materials for known flow curve. The flow curves in the method are approximated with a power function by Ludwig. Verification of the proposed method was carried out by comparison with theoretical solutions and finite element modeling of various processes of pressure.

**Keywords:** power characteristics, finite element method, the model material, full-scale material, power function, flow curve

УДК 621.77

*І. В. ГУНЬКО*, канд. техн. наук, проф., проректор ВНАУ, Вінниця

### **ОЦІНКА ГРАНИЧНИХ МОЖЛИВОСТЕЙ ПРОЦЕСУ ТА ДЕФОРМІВНОСТІ МАТЕРІАЛІВ ПРИ ФОРМУВАННІ ЗАГОТОВОК ВАЛЬЦЮВАННЯМ**

Запропоновано методіку визначення напружено-деформованого стану на вільній поверхні заготовки при вальцюванні. В основу методіки покладено експериментально-аналітичний метод, що передбачає відновлення за експериментальними даними аналітичної залежності між компонентами логарифмічних деформацій. Побудовано узагальнену скалярну модель граничного стану матеріалу вільної поверхні заготовки при вальцюванні.

**Ключові слова:** вальцювання, коефіцієнт витяжки, напружено-деформований стан, вільна поверхня, показник напруженого стану, гранична деформація.

**Вступ.** Процес формування вальцюванням використовується переважно в якості підготовчої операції до об'ємного штампування з метою цілеспрямованого перерозподілу металу вихідної заготовки. При цьому забезпечується усунення надмірної нерівномірності деформації, неодночасного заповнення металом порожнини штампу, досягнення високої ступені деформації; виготовлення якісних штампованих виробів з високим коефіцієнтом використання металу; виготовлення складно профільованих виробів, в т.ч. з криволінійною віссю; формування сприятливої структури металу і покращення його механічних характеристик [1].

Формування заготовок здійснюється в калібрах. Абсолютні зміни вихідної висоти  $H_0$ , ширини  $B_0$  і довжини  $l_0$  вальцюваної заготовки називають відповідно абсолютним обтискуванням  $\Delta H$ , абсолютним потовщенням  $\Delta B$  і абсолютним видовженням  $\Delta l$ . Відносні зміни розмірів заготовки характеризують переважно коефіцієнтом витяжки

© І. В. Гунько, 2012

$$\lambda = \frac{l_1}{l_0} = \frac{H_0 B_0}{H_1 B_1} = \frac{S_0}{S_1}, \quad (1)$$

де  $S_0$  и  $S_1$  – відповідно площа поперечного перерізу заготовки до і після проходу.

При вальцюванні за декілька проходів сумарний коефіцієнт витяжки  $\lambda_{\Sigma} = S_0/S_n$  пов'язаний з коефіцієнтом витяжки на окремих проходах співвідношенням

$$\lambda_{\Sigma} = \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_n, \quad (2)$$

де  $\lambda_1 = S_0/S_1$ ;  $\lambda_2 = S_1/S_2$ ; ...  $\lambda_n = S_{n-1}/S_n$  – коефіцієнти витяжки на першому, другому і т.д. проходах.

В залежності від конфігурації заготовки і загального коефіцієнта витяжки  $\lambda_{\Sigma}$  вальцювання може здійснюватися за один або декілька проходів з використанням овальних, круглих, квадратних, ромбічних та інших калібрів. Вибір тієї чи іншої схеми формування вальцюванням і числа проходів визначається, головним чином, необхідним коефіцієнтом витяжки, а також вимогами до форми отриманої заготовки.

Дослідниками побудовано ряд кривих [2], які відповідають максимально можливо-му коефіцієнту витяжки при формуванні заготовок вальцюванням за один і декілька проходів, при забезпеченні достатньої стійкості протікання процесу. Використовуючи приведені залежності можна вибрати необхідну схему і необхідне число проходів.

Слід також відзначити, що в силу відмінностей технологічних процесів традиційного і ізотермічного вальцювання абсолютні значення таких параметрів, як коефіцієнт витяжки, потовщення, випередження, а також питомі зусилля будуть не однакові. В табл. 1 приведені рекомендовані нами коефіцієнти витяжки при вальцюванні заготовок з алюмінієвих сплавів в гладких валках і калібрах, отримані на основі багаторічного досвіду впровадження процесу вальцювання у виробництво.

Таблиця 1. Значення максимально допустимого коефіцієнта витяжки  $\lambda$  для вальцювання заготовок з алюмінієвих сплавів в гладких валках і різних системах калібрів

№ пор.	Поперечний переріз заготовки вздовж стержня	$\lambda$	Гладкі валки або система калібрів
1	Постійний або змінний	$\lambda = 2,0$	Гладкі валки
2	-//-	$\lambda \leq 2,2$	Калібр плоский або однорадіусний
3	Постійний Змінний	$2,2 < \lambda \leq 3,3$ $2,2 < \lambda \leq 4,5$	Круг-овал-ромб
4	Постійний Змінний	$2,2 < \lambda \leq 3,5$ $2,2 < \lambda \leq 4,7$	Круг-овал-квадрат
5	Постійний Змінний	$3,7 < \lambda \leq 4,5$ $3,7 < \lambda \leq 6,2$	Круг-овал-ромб-квадрат
6	Постійний Змінний	$1,8 < \lambda \leq 2,5$ $2,5 < \lambda \leq 3,9$	Круг-овал-круг
7	Постійний Змінний	$1,8 < \lambda \leq 2,5$ $2,5 < \lambda \leq 3,9$	Круг-овал-ромб-круг

Таким чином, на сьогодні достатньою мірою розроблені параметри гарячого і ізотермічного вальцювання, які забезпечують стійкість протікання процесу. Разом з тим, практично відсутні роботи, присвячені оцінці деформівності матеріалу заготовок в процесах формування їх вальцюванням. Це обмежує застосування даних процесів для холодного формування заготовок, яке очевидно доцільно використовувати для пластичних металів, особливо при однопрохідному вальцюванні.

**Метою даної роботи** є аналіз напружено-деформованого стану і оцінка деформівності матеріалу заготовок в процесах їх формування вальцюванням.

Для досягнення поставленої мети побудуємо моделі граничних деформацій при вальцюванні для точок матеріалу вільної поверхні заготовки, як найбільш небезпечної з точки зору тріщиноутворення. Визначення рівня накопичених пошкоджень із застосуванням моделей накопичення пошкоджень належним чином висвітлено в роботах [3, 4, 5].

Аналіз напружено-деформованого стану проводили з використанням методу сіток. В якості типових були вибрані схеми вальцювання циліндричних заготовок в гладких валках і круг-овал як такі, при яких реалізується найбільш жорсткий напружений стан матеріалу [6]. При дослідженні на торець і циліндричну поверхню заготовки  $\varnothing 50 \times 150$  мм наносилась координатна сітка розміром  $5 \times 5$  мм, яка після деформації заготовки надавала можливість визначати переміщення і деформації на поверхні досліджуваного зразка, рис. 1, а.

Крім того використовувалися складні заготовки зі зразків різних діаметрів з нанесеною координатною сіткою, рис. 1, б. Переміщення точок координатної сітки на zdeформованих після вальцювання зразках вимірювалися на інструментальному мікроскопі БМІ – 1.

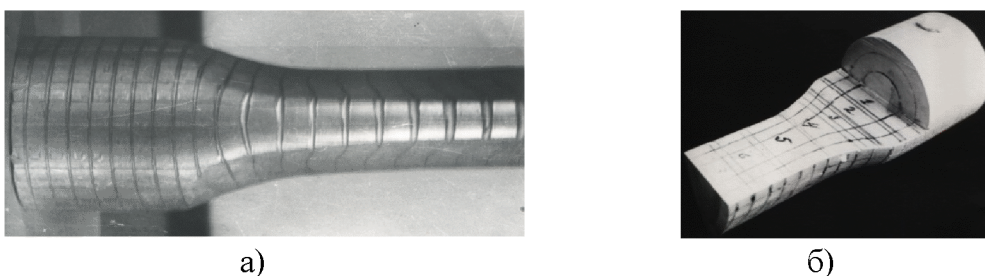


Рис. 1. – Вигляд координатної сітки на поверхні: а – суцільної; б – складної вальцьованої заготовка зі зразків різних діаметрів:

На рис. 2 представлена картина переміщення координатних сіток в на вільній боковій поверхні і по об'єму заготовки.

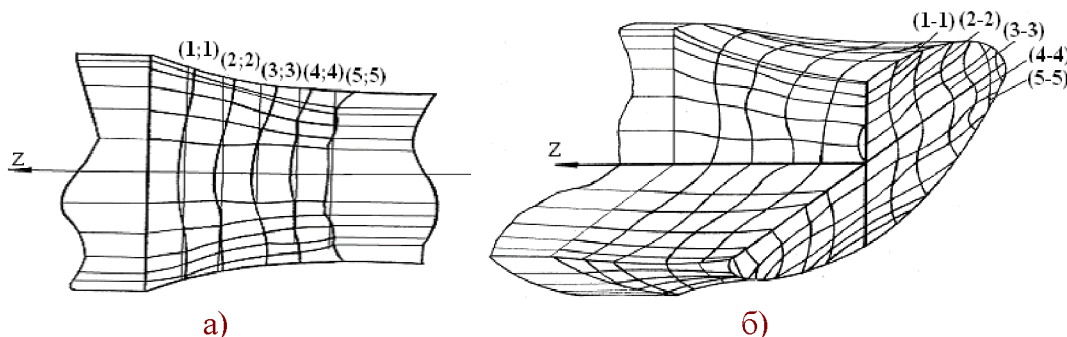


Рис. 2. – Переміщення координатної сітки: а – на боковій поверхні; б – по об'єму вальцьованої заготовки:

Користуючись результатами роботи [7] залежність між осьовою  $\varepsilon_z$  та поздовжньою  $\varepsilon_y$  деформаціями вільної поверхні зразка під час вальцювання подамо у вигляді диференціального рівняння

$$\frac{d\varepsilon_z}{d\varepsilon_y} = -\frac{\xi \cdot \varepsilon_y^2 + 2 \cdot m^2}{\varepsilon_y^2 + m^2}, \quad m > 0, \quad \frac{1}{2} \leq \xi \leq 2; \quad (3)$$

де  $m, \xi$  – константи, які визначаються експериментально.

Очевидно, що величина  $\xi$  буде визначатися умовами вальцювання: схемою формування, коефіцієнтами обтискування та витяжки заготовки та її типорозміром, умовами тертя на контактні валків з заготовкою та ін.

Розв'язком диференціального рівняння (3) є співвідношення:

$$\varepsilon_z = -\xi \cdot \varepsilon_y - (2 - \xi) \cdot m \cdot \arctg\left(\frac{\varepsilon_y}{m}\right). \quad (4)$$

Параметричне представлення (4) має наступний вигляд:

$$\begin{cases} \varepsilon_y = m \cdot \operatorname{tg}(t); \\ \varepsilon_z = -m \cdot (\xi \cdot \operatorname{tg}(t) + (2 - \xi) \cdot t); \end{cases} \quad t \in \left[0, \frac{\pi}{2}\right]. \quad (5)$$

Із урахуванням (5) отримано аналітичне описання траєкторії деформацій

$$\varepsilon_{II}(t, m, \xi) = \frac{2}{3} \cdot m \cdot \sqrt{3} \cdot \int_0^t \sqrt{\frac{\xi^2 - \xi + 1}{\cos^4(\tau)} - \frac{2 \cdot \xi^2 - 5 \cdot \xi + 2}{\cos^2(\tau)} + (2 - \xi)^2} \cdot d\tau, \quad (6)$$

$$\eta(t, \xi) = \frac{6 \cdot (-\xi - (2 - \xi) \cdot \cos^2(t) + 1)}{\sqrt{9 + 3 \cdot (1 - 2 \cdot \xi - 2 \cdot (2 - \xi) \cdot \cos^2(t))^2}}. \quad (7)$$

В роботі для оцінки напруженого стану матеріалу вибрано показник жорсткості напруженого стану  $\eta = I_1(T_\sigma) / \sqrt{3I_2(D_\sigma)}$  ( $I_1(T_\sigma)$  і  $I_2(D_\sigma)$  – перший інваріант тензора і другий інваріант девіатора напружень).

На рис. 3 приведено розподіл показника напруженого стану  $\eta$  на поверхні заготовки при вальцюванні.

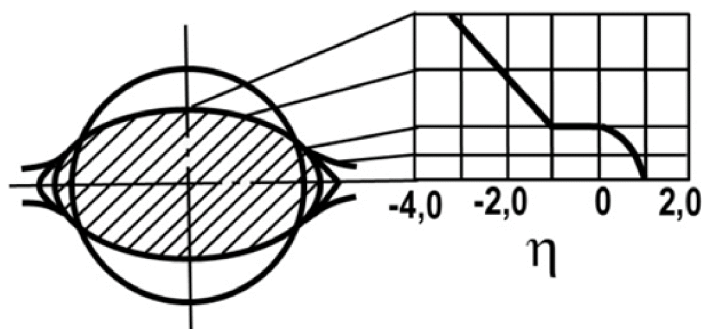


Рис. 3 – Розподіл показника напруженого стану  $\eta$  на поверхні заготовки при вальцюванні за схемою круг-овал

Таким чином, в зоні контакту валків з заготовкою спостерігається м'яка схема напруженого стану, яка відповідає двох-тривісному стиску. На вільній поверхні заготовки напружений стан близький до одноосного розтягу ( $\eta = 1$ ). Тому найбільш небезпечною зоною з точки зору руйнування дійсно є вільна бокова поверхня заготовки. Разом з тим, як видно з представленої нижче інформації (табл. 2), пластичність деформованих алюмінієвих сплавів є достатньо високою навіть в зоні одноосного розтягу, що надає можливість вальцювати їх в холодному стані зі значними коефіцієнтами витяжки.

Таблиця 2. Значення  $\varepsilon_p$  в залежності від матеріалу та  $\eta$

Марка матеріалу	$\varepsilon_p(\eta_1=1)$	$\varepsilon_p(\eta_1=0)$	$\varepsilon_p(\eta_1=-1)$
АМГ5В	0,74	1,0	1,3
АМГ-2	1,1	1,6	2,3

На основі використання методики побудови аналітичних моделей граничних деформацій бічної поверхні зразків із використанням залежності між компонентами деформацій [7, 8] та апроксимації кривої граничних деформацій [9].

$$\varepsilon_{*c}(\eta) = a_2 \cdot \exp\left(-\eta \cdot \ln\left(\frac{(1-\eta) \cdot a_1}{2 \cdot a_2} + \frac{(1+\eta) \cdot a_2}{2 \cdot a_3}\right)\right), \quad \eta \in [-1, 1], \quad (8)$$

де  $a_1 = \varepsilon_{*c}$ ,  $a_2 = \varepsilon_{*k}$ ,  $a_3 = \varepsilon_{*p}$  – граничні деформації для стиску, зсуву та розтягу відповідно, побудовано узагальнену аналітичну модель граничних деформацій

$$\psi(\varepsilon_u(t, m)) = \bar{\psi}(t, m) = \frac{m}{3 \cdot \varepsilon_{*k}} \times \int_0^t \frac{\exp\left[\omega(\tau) \cdot \ln\left(\varepsilon_{*c} \cdot \frac{1-\omega(\tau)}{2 \cdot \varepsilon_{*k}} + \varepsilon_{*k} \cdot \frac{1+\omega(\tau)}{2 \cdot \varepsilon_{*p}}\right)\right]}{f(2, \tau) \cdot \cos^2(\tau)} d\tau, \quad (9)$$

де

$$\omega(\tau) = f(1, \tau) \cdot f(2, \tau), \quad (10)$$

$$f(k, \tau) = \left(9 \cdot (k-1) + 3 \cdot (3-k) \cdot \left(1-k \cdot \xi - k \cdot (2-\xi) \cdot \cos^2(\tau)\right)^k\right)^{\frac{(-1)^{k+1}}{k}}, \quad k=1,2. \quad (11)$$

Визначення моменту досягнення граничної деформації для даного матеріалу, який ідентифікується значеннями граничних деформацій  $\varepsilon_{*c}$ ,  $\varepsilon_{*k}$ ,  $\varepsilon_{*p}$ , і для певної траєкторії деформацій, яка визначається фіксованим значенням параметра апроксимації  $m$ , полягає у розв'язанні нелінійного рівняння

$$\frac{m}{3 \cdot \varepsilon_{*k}} \cdot \int_0^{t_*(m)} \frac{\exp\left[\omega(\tau) \cdot \ln\left(\varepsilon_{*c} \cdot \frac{1-\omega(\tau)}{2 \cdot \varepsilon_{*k}} + \varepsilon_{*k} \cdot \frac{1+\omega(\tau)}{2 \cdot \varepsilon_{*p}}\right)\right]}{f(2, \tau) \cdot \cos^2(\tau)} d\tau - 1 = 0, \quad (12)$$

де  $t_*(m)$  – значення параметра  $t$ , який характеризує стадію процесу вальцювання за даних умов, що відповідає моменту утворення тріщини.

Слід зазначити, що відома модель граничних деформацій [8, 10] є частинним випадком (9)-(12) для  $\xi = 0,5$ . У цьому випадку маємо

$$\frac{m}{\varepsilon_{*k}} \cdot \int_0^{t_*(m)} \frac{\exp\left[\omega(\tau) \cdot \ln\left(\varepsilon_{*c} \cdot \frac{1-\omega(\tau)}{2 \cdot \varepsilon_{*k}} + \varepsilon_{*k} \cdot \frac{1+\omega(\tau)}{2 \cdot \varepsilon_{*p}}\right)\right]}{f(2, \tau) \cdot \cos^2(\tau)} d\tau - 1 = 0, \quad (13)$$

$$\omega(\tau) = f(1, \tau) \cdot f(2, \tau), \quad f(k, \tau) = \left(1 + (-1)^k \cdot 3 \cos^2 k(\tau)\right)^{\frac{(-1)^{k+1}}{k}}, \quad k=1,2. \quad (14)$$

Побудовану модель граничних деформацій доцільно використовувати для вальцювання заготовок.

**Висновок.** В роботі запропоновано методику визначення НДС на вільній поверхні заготовки при вальцюванні. Побудовано скалярну модель граничного стану матеріалу вільної поверхні заготовки при вальцюванні, що надає можливість оцінити рівень накопичених пошкоджень як для операцій формування заготовок вальцюванням, так і для наступних операцій, якщо такі передбачено технологічним процесом виготовлення виробів.

Отримані результати мають як самостійне значення для аналізу якості поверхневого шару в областях вільної поверхні заготовки під час вальцювання, так і для налаштування моделювання пластичного деформування всієї заготовки методом скінченних елементів за допомогою існуючих комплексів.

**Список літератури.** 1. Гунько И.В. Экспериментальные исследования давления при традиционной и изотермической вальцовках / И.В.Гунько // Технологические системы. 2010. №4. – С. 76-80. 2. Смирнов В. К. Фасонирование заготовок лопаток на ковочных вальцах / В. К. Смирнов, Ш. Д. Кошаев, С. В. Харитонин, А. А. Жилкин. М.: Военное издательство. 1982. – 260с. 3. Огородников В. А. Оценка деформируемости металлов при обработке давлением / Огородников В. А. – К. : Выща шк., 1983. – 200 с. 4. Матвийчук В. А. Совершенствование процессов локальной ротационной обработки давлением на основе анализа деформируемости металлов: монография / В. А. Матвийчук, И. С. Алиев. – Краматорск: ДГМА, 2009. – 268 с. 5. Михалевиц В. М. Тензорні моделі накопичення пошкоджень / Михалевиц В. М. — Вінниця : УНІВЕРСУМ–Вінниця, 1998. — 195 с. – ISBN 966-7199-20-7. 6. Скрябин С. А. Определение возможности появления дефектов при штамповке поковок с применением процесса вальцовки подготовительных ручьев/ С. А. Скрябин, И. В. Гунько, Д. С. Чайка, И. А. Бубновская/ Обработка материалов давлением: сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА. – 2010. – №3(24). – С. 76–81. 7. Михалевиц В. М. Моделирование пластического деформирования цилиндрического образца при торцевом сжатии / Михалевиц В. М., Лебедев А. А., Добранюк Ю.В. // Пробл. прочности. — 2011. — № 6. — С. 5—22. 8. Михалевиц В. М. Моделирование предельных деформаций на свободной поверхности при осесимметричной осадке / Михалевиц В. М., Краевський В. А., Добранюк Ю. В. // Прогрессивные методы и технологическое оснащение процессов обработки металлов давлением: мат. междуна-род. науч.-техн. конф. – Балт. гос. техн. ун-т., СПб. – 2009. – С. 108–112. – ISBN 978-5-85546-474-0. 9. Михалевиц В. М. Аппроксимация кривых предельной деформации сплайн-функциями / В. М. Михалевиц, Л. И. Алиева // Обработка металлов давлением: сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА. – 2010. – №3(24). – С. 3–10. 10. Dependence of plastic ultimate strain from a friction at end faces at axisymmetric compression [Mikhalevich V. M., Dobranuk Y. V., Kraevsky V. A., Mikhalevich O. V.] / Bulet. Inst. Politehnic Din Iasi. – Iasi. – 2008. – Tomul LIV(LVIII), Fasc. 3–4. – p. 49–53.

Надійшла до редколегії 20.10.2012

УДК 621.77

**Оцінка граничних можливостей процесу та деформівності матеріалів при формуванні заготовок вальцюванням / Гунько І. В. // Вісник НТУ «ХПІ». Серія: Нові рішення в сучасних технологіях. – Харків: НТУ «ХПІ». – 2012. – №47(953). – С. 23–28. – Бібліогр.: 10 назв.**

Предложена методика определения напряженно-деформированного состояния на поверхности заготовки при вальцовке. В основу методики положен экспериментально-аналитический метод, который предусматривает восстановление по экспериментальным данным аналитической зависимости между компонентами логарифмических деформаций. Построена обобщенная скалярная модель предельного состояния материала свободной поверхности заготовки при вальцовке.

**Ключевые слова:** вальцовка, коэффициент вытяжки, напряженно-деформированное состояние, свободная поверхность, показатель напряженного состояния, предельная деформация.

The method of determining the mode of deformation at the surface of the workpiece with forge-rolling offered. The method is based on the experimental-analytical methods construction analytical relationship between the components of the logarithmic strains. Generalized scalar model of the limit state of the material at the workpiece's free surface for forge-rolling is constructed.

**Keywords:** mode of deformation, free surface, limit state, accumulated damage, the scalar model, the tensor model, rolling.

УДК. 621.7.044

**В. В. ДРАГОБЕЦКИЙ**, докт. техн. наук, проф., КрНУ, Кременчуг

**Т. В. ГАЙКОВА**, аспирант, КрНУ, Кременчуг

**Р. Г. ПУЗЫРЬ**, канд. техн. наук, доц., КрНУ, Кременчуг

## **ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТЕХПРОЦЕССА ИЗГОТОВЛЕНИЯ КОНТАКТА ВЫКАТНОГО ЭЛЕМЕНТА ИЗ БИМЕТАЛЛА НА ОСНОВЕ ПОСТРОЕНИЯ КРИВЫХ УПРОЧНЕНИЯ РАЗНОРОДНЫХ МЕТАЛЛОВ**

Рассматривается применение биметаллических материалов в различных отраслях промышленности. Показано, что использование слоистых металлов в качестве контактов соединителей в электрических аппаратах дает значительный экономический эффект, повышает надежность и долговечность соедине-

© В. В. Драгобецкий, Т. В. Гайкова, Р. Г. Пузырь, 2012