Наука и Образование
МГТУ им. Н.Э. Баумана
Сетевое научное издание
ISSN 1994-0408

Наука и Образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 12. С. 1–11.
DOI: **10.7463/1214.0739772**
Представлена в редакцию: 13.11.2014

УДК 621.771.2

Измерение сил прокатки супермногослойных стальных материалов и определение зависимости сопротивления деформации от параметров процесса

Колесников А.Г.[1], Плохих А.И.[1], Шинкарев А.С.[1,*]

[*]shinkaryov@bmstu.ru

[1]МГТУ им. Н.Э. Баумана, Москва, Россия

Целью данной работы является сравнительный анализ известных расчетных зависимостей для определения величины сопротивления деформации при прокатке разнородных многослойных материалов с экспериментальными данными при прокатке 100-слойных образцов. Объектами исследования являлись 100-слойные композиции на основе чередующихся слоев сталей 08Х18Н10 и У8. Сравнение сил прокатки многослойной композиции У8+08Х18Н10, полученных в ходе эксперимента, с расчетными значениями, показывает, что при накопительном характере деформаций реальные силы прокатки превышают расчетные значения в 1,5 – 2 раза. Таким образом, неправомерным является использование среднепропорциональной величины пределов текучести для расчетов сил прокатки композиций с большим числом чередующихся тонких слоев различных сталей.

Ключевые слова: многослойные стальные материалы, сила прокатки, сопротивление деформации, ультрамелкозернистая структура

Введение

Для создания новых типов машин, повышения их надежности, увеличения ресурса работы, снижения металлоемкости изделий требуется улучшение механических, физических, а также специальных свойств конструкционных материалов, применяемых в машиностроении. В настоящее время интенсивные научные исследования и разработки ведутся в направлении создания материалов с ультрамелкозернистой структурой. Одной из таких, является технология получения многослойных стальных листов с устойчивой ультрамелкозернистой структурой, основанная на многократной горячей прокатке композитных заготовок [1-3]. Одним из условий реализации такой технологии является горячая прокатка при условии существования составляющих композиции в разных кристаллографических модификациях (рисунок 1).

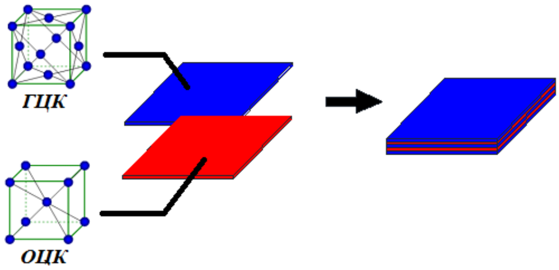


Рисунок 1. Кристаллические модификации в слоях стали.

Энергосиловые параметры прокатки являются важной технологической характеристикой процесса. Обычно для определения величины сопротивления деформации при прокатке разнородных многослойных материалов используется усреднение величины фактического сопротивления по отношению к составляющим композиции. Целью данной работы является сравнительный анализ известных расчетных зависимостей с экспериментальными данными при прокатке 100-слойных образцов.

1. Материалы и методы исследования

Экспериментальные образцы представляют собой пакет с размерами 53х53х200 мм, состоящий из 100 листов толщиной 0,5 мм каждый, сталей У8 и 08Х18Н10, сложенных через одну (рисунок 2).

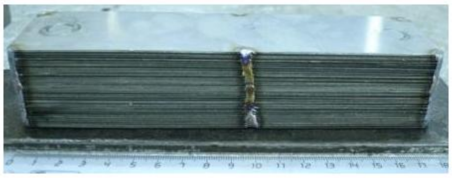


Рисунок 2. Общий вид образцов, подготовленных к прокатке

Слоистые образцы предварительно вакуумировались в герметичных капсулах до степени разряжения 10^{-2} мм рт. ст. Перед каждым проходом образцы нагревались в камерной печи до температуры равной $T =$ 1000°С. Прокатка велась на двухвалковом стане с диаметром валков 160 мм за 19 проходов до толщины 7 мм со скоростью 0,1 м/с. Относительное обжатие в каждом проходе принималось равным 10±2,5%. Основанием выбора степени деформации послужили ранее проведенные исследования [4, 5], которые установили эту величину оптимальной для данного процесса, не приводящей к разрушению ламинарного строения многослойного листа при прокатке.

Измерение сил прокатки проводилось методом тензометрии при помощи месдоз, расположенных под нажимными винтами стана. Температура прокатки контролировалась при помощи печной термопары и регистрировалась двумя пирометрами Optris CTlaser 3MH3, установленными на входной и выходной частях стана.

Расчет величина силы прокатки проводился исходя из основных положений теории прокатки А.И. Целикова [6,7], в соответствии с выражением

$$P = p_{ср} \cdot F = \gamma \cdot n_{\sigma} \cdot \sigma_{ф} \cdot F, \tag{1}$$

где $p_{ср}$ – среднее контактное давление в очаге деформации; $F = B_{ср} \cdot l$ – площадь контакта металла с валками, γ – коэффициент Лоде, учитывающий влияние среднего нормального напряжения на контактное давление; n_{σ} – коэффициент, учитывающий влияние напряженного состояния в очаге деформации; $\sigma_{ф}$ – фактическое сопротивление деформации, отражающее значение предела текучести материала для заданных условий процесса: температуры, степени деформации и скорости деформации.

В нашем случае при анализе процесса прокатки многослойной композиции принимались следующие допущения.

1) Композиция из чередующихся слоев представляется в виде однородного эквивалентного материала (основанием для такого подхода служит получение надежного соединения слоев уже в первых проходах прокатки в условиях вакуума при высокой температуре).

2) Величина фактического сопротивления деформации эквивалентного материала принимается усредненной по сечению по отношению к составляющим композиции. Усреднение величины фактического сопротивления деформации $\sigma_{ф.ср}$ проводилось в соответствии с зависимостью, рекомендованной для случая прокатки биметаллов [8,10]:

$$\sigma_{ф.ср.} = \frac{\sigma_{ф.т} \cdot h_{т} + \sigma_{ф.м} \cdot h_{м}}{h_{т} + h_{м}} \, . \tag{2}$$

Здесь $\sigma_{ф.т}$ – фактическое сопротивление деформации твердого материала; $\sigma_{ф.м}$ – фактическое сопротивление деформации мягкого материала; $h_{т}$ – толщина твердого материала; $h_{м}$ – толщина мягкого материала.

В наших исследованиях при расчете усредненной величины фактического сопротивления деформации по формуле (2) принимаем значения $\sigma_{ф.т}$ и $\sigma_{ф.м}$ согласно справочным данным [7].

Расчет сил прокатки по среднему сопротивлению деформации для композиции сталей У8 и 08Х18Н10. Для композиции У8+08Х18Н10 при температуре $T =$ 1000°С, ε =10%, u =0,5 с$^{-1}$ сопротивление деформации составляет:

сталь У8 – $\sigma_{ф} = 50$ МПа,

сталь 08Х18Н10 – $\sigma_{ф} = 100$ МПа (по данным для стали Х18Н9Т), Таким образом, при $T = 1000$°С, ε =10%, u =0,5 с$^{-1}$ среднее сопротивление для композиции сталей составляет $\sigma_{комп}$ = 75МПа. Аналогичным образом, получаем усредненную диаграмму упрочнения для других обжатий (рисунок 4).

Согласно установленному маршруту прокатки (рис. 3) скорость деформации изменяется в диапазоне u=0,9÷2 с$^{-1}$. По справочным данным, руководствуясь методом термомеханических коэффициентов, определяем средние значения сопротивления деформации для композиции сталей У8 и 08Х18Н10 в зависимости от суммарного относительного обжатия $\varepsilon_\Sigma = \dfrac{\Delta h_i}{h_0}$, где Δh_i – абсолютное обжатие в i-ом проходе, h_0 – начальная толщина заготовки. По полученным значениям сопротивления деформации проведен расчет сил прокатки для многослойной композиции сталей У8+08Х18Н10. Расчетные значения зависимостей сопротивления деформации и сил прокатки от суммарного относительного обжатия представлены соответственно на рисунках 5 и 6.

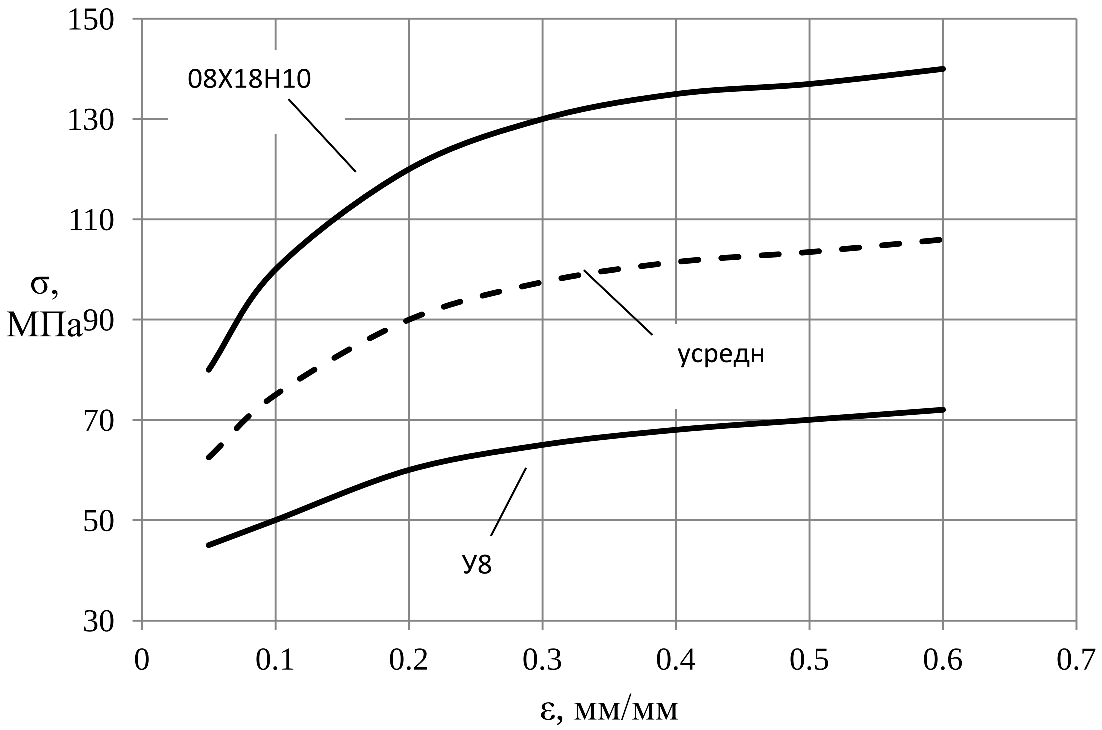


Рисунок 4. Зависимость среднего сопротивления деформации композиции сталей У8 и 08Х18Н10 от относительного обжатия.

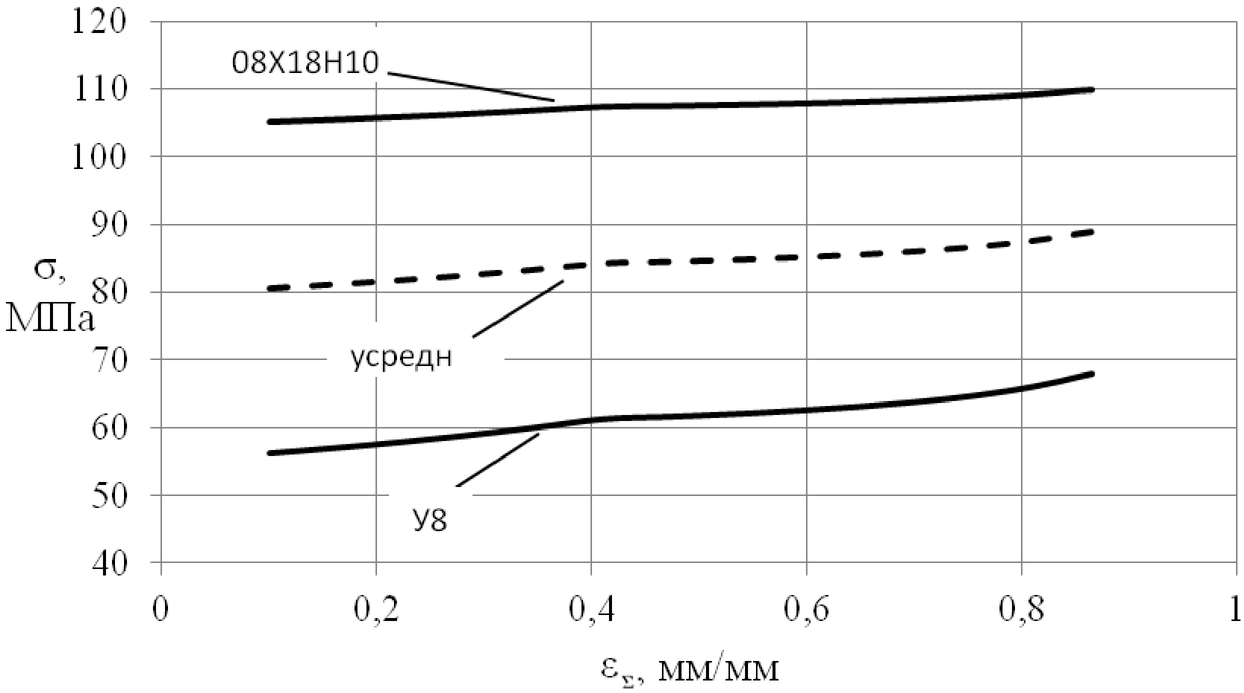


Рисунок 5. Зависимость среднего сопротивления деформации композиции сталей У8 и 08Х18Н10 от суммарного относительного обжатия.

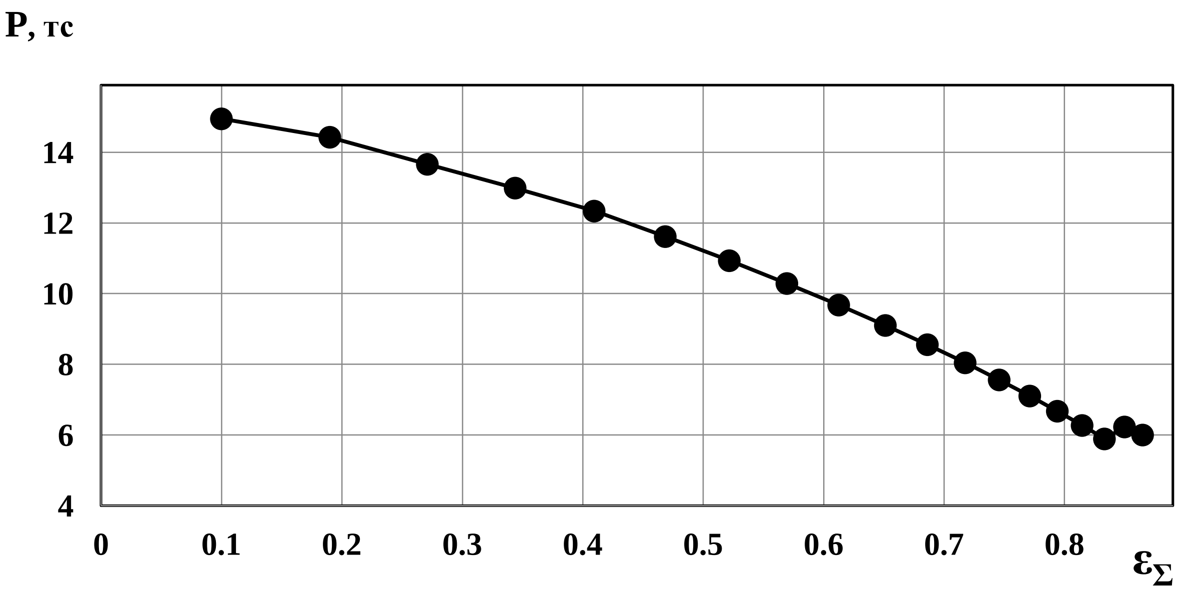
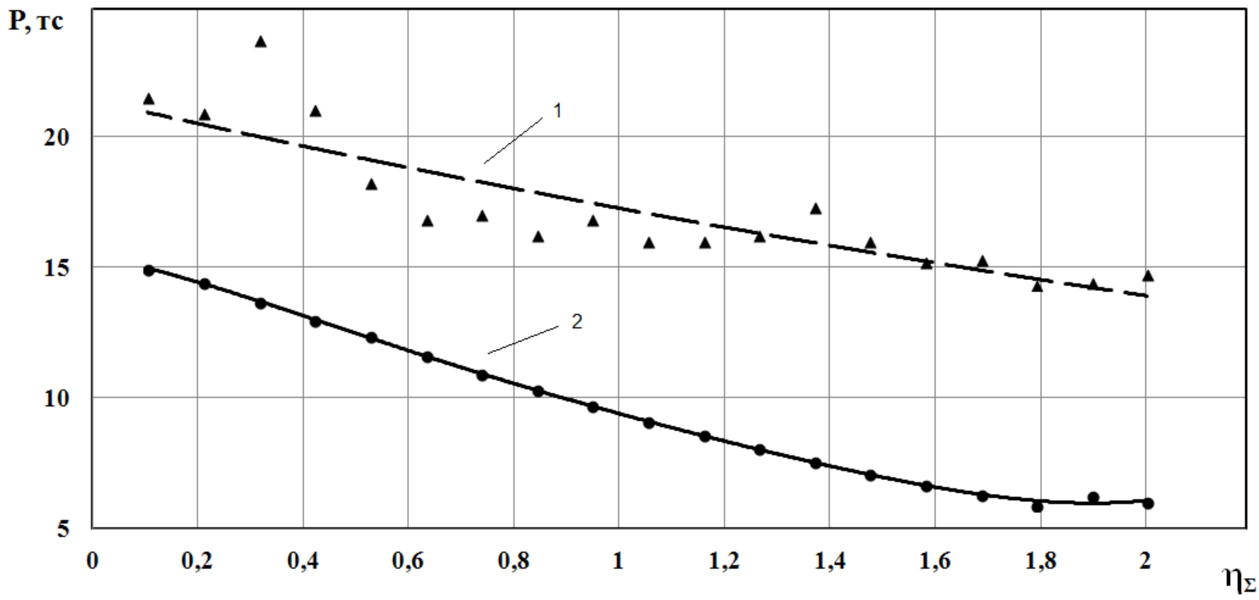


Рисунок 61. Зависимость сил прокатки от суммарного относительного обжатия, полученная по усредненному сопротивлению сталей У8 и 08Х18Н10.

2. Результаты экспериментального определения сил прокатки

На рисунке 7 приведены зависимости величины силы прокатки многослойной композиции (У8+08Х18Н10) от суммарного истинного обжатия, где суммарная истинная деформация $\eta_\Sigma = \ln\frac{h_0}{h_i}$, полученные в ходе эксперимента (кривая 1) и рассчитанные по среднему сопротивлению деформации сталей У8 и 08Х18Н10 (кривая 2).



▲ – экспериментальные значения для прокатки композиции У8+08Х18Н10;

● – расчет по среднему сопротивлению деформации сталей 08Х18Н10 и У8.

Рисунок 7. Экспериментальные и расчетные значения сил прокатки в зависимости от суммарной относительной деформации для композиции сталей 08Х18Н10 и У8.

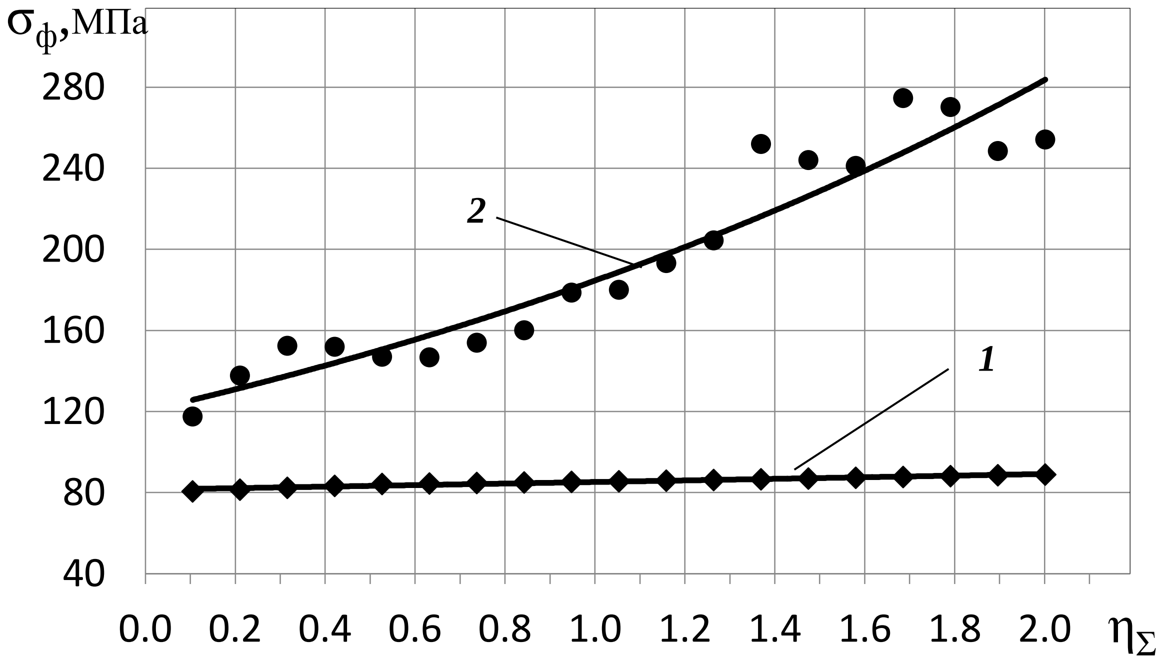
Сравнение сил прокатки многослойной композиции У8+08Х18Н10, полученных в ходе эксперимента, с расчетными значениями показывает, что при накопительном характере деформаций реальные силы прокатки превышают расчетные значения в 1,5 – 2 раза.

Для количественной оценки различия между значениями сопротивления деформации многослойного и монолитного материалов проводился обратный расчет по формуле (3), в которой использовались экспериментальные данные о величине сил прокатки

$$\sigma_\phi = \frac{P_{экс}}{\gamma \cdot n_\sigma \cdot F}, \qquad (3)$$

где $P_{экс}$ – экспериментальные значения силы прокатки.

На рисунке 8 представлено сравнение сопротивления деформации, полученного по экспериментальным данным (кривая 2) и рассчитанного методом усреднения (кривая 1).



кривая 1 – усредненное сопротивление деформации сталей 08Х18Н10 и У8
кривая 2 – сопротивление деформации композиции сталей 08Х18Н10+У8, рассчитанное по экспериментальным данным.

Рисунок 8. Зависимость сопротивления деформации от суммарной истинной деформации.

Для обработки полученных экспериментальных данных о зависимости сопротивления деформации супермногослойных композиций сталей У8+08Х18Н10 от параметров прокатки был использован метод многофакторной регрессии. Модель линейной регрессии записывалась в виде формулы

$$\sigma_{ф} = \sigma_0 - k_T \cdot T + k_u \cdot u + k_\varepsilon \cdot \varepsilon\ ,$$

где σ_0 – начальный предел текучести композиции; k_T – температурный коэффициент; k_u – коэффициент, характеризующий зависимость от скорости деформации; k_ε – коэффициент, характеризующий зависимость от величины деформации.

По результатам расчетов получена зависимость сопротивления деформации композиции (08Х18Н10 + У8) от параметров прокатки

$$\sigma_{ф} = 657 - 0{,}54 \cdot T + 80{,}73 \cdot \eta_\Sigma + 28{,}5 \cdot u\ , \quad (4)$$

где суммарная истинная деформация $\eta_\Sigma = \ln\dfrac{h_0}{h_i}$=0,1÷3; i – номер прохода; температура прокатки T=600÷1200 ˚С; скорость деформации u=0,5÷3 с$^{-1}$.

Заключение

Сравнительный анализ экспериментальных и расчетных данных по прокатке многослойного материала показал существенное влияние слоистой структуры на величину силы прокатки и необходимость корректировки выражения (2). Для расчетов давления металла на валки при горячей прокатке исследованной 100-слойной композиции сталей (08Х18Н10 + У8) предлагается использовать зависимость (4).

Таким образом, неправомерным является использование среднепропорциональной величины пределов текучести для расчетов сил прокатки композиций с большим числом чередующихся тонких слоев различных сталей. Для расчетов сил прокатки таких супермногослойных материалов сопротивление деформации каждой композиции следует определять на основании экспериментальных данных.

Список литературы

1. Колесников А.Г., Плохих А.И., Комиссарчук Ю.С., Михальцевич И.Ю. Исследование особенностей формирования субмикро- и наноразмерной структуры в многослойных материалах методом горячей прокатки // МиТОМ (Металловедение и термическая обработка металлов). 2010. № 6. С. 44-49.
2. Колесников А.Г., Плохих А.И., Михальцевич И.Ю. Исследование возможности получения субмикро-и наноразмерной структуры в многослойных материалах методом горячей прокатки // Производство проката. 2010. №. 3. С. 25-31.
3. Колесников А.Г., Плохих А.И. Конструкционные металлические материалы с субмикро- и наноразмерной структурой // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. 2010. Спец. вып. С. 44-52.
4. Шинкарев А.С., Колесников А.Г. Моделирование прокатки многослойных композитов на основе разнородных металлов // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2011. № 5. Режим доступа: http://technomag.bmstu.ru/doc/191739.html (дата обращения 01.11.2014).
5. Колесников А.Г., Плохих А.И., Шинкарев А.С., Миронова М.О. Прокатка стального многослойного материала // Заготовительные производства в машиностроении. 2013. № 8. С. 39-42.
6. Никитин Г.С. Теория непрерывной продольной прокатки: учеб. пособие. М.: Изд-во МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2009. 399 с.
7. Целиков А.И., Томленов А.Д., Зюзин В.И., Третьяков А.В., Никитин Г.С. Теория прокатки. М.: Металлургия, 1982. 335 с.
8. Голованенко С.А. Сварка прокаткой биметаллов. М.: Металлургия, 1977. 160 с.
9. Чарухина К.Е., Голованенко С.А., Мастеров В.А., Казаков Н.Ф. Биметаллические соединения. М.: Металлургия, 1970. 160 с.

10. Кобелев А.Г., Лысак В.И., Чернышов В.Н., Быков А.А., Востриков В.П. Производство слоистых композиционных материалов. М.: Интермет-Инжиниринг, 2002. 496 с.

Science&Education of the Bauman MSTU
Electronic journal
ISSN 1994-0408

Science and Education of the Bauman MSTU, 2014, no. 12, pp. 1–11.

DOI: **10.7463/1214.0739772**

Received: 13.11.2014

Multilayer Steel Materials Deformation Resistance and Roll Force Measurement

A.G. Kolesnikov[1], A.I. Plohih[1], A.S. Shinkaryov[1,*]

[*] shinkaryov@bmstu.ru

[1] Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: multilayer steel materials, deformation resistance, roll force, ultrafine-grained structure

To create new types of cars, raise their reliability, gain operational life, and decrease in metal consumption of products it is necessary to improve mechanical, physical, and also special properties of the constructional materials applied in mechanical engineering. Presently, there are intensive researches and developments under way to create materials with ultrafine-grained structure (the sizes of grains in their crystal lattice make less than 1 micron in one of the measurements).

BMSTU developed a manufacturing technology of multilayer steel sheets with steady ultrafine-grained structure based on the multiple hot rolling of billet as a composition consisting of the alternating metal sheets. A principled condition for implementation of such technology is existence of different crystallographic modifications in the adjoining sheets of the composition at specified temperature of rolling.

Power parameters of rolling are important technical characteristics of the process. Usually, to determine a deformation resistance value when rolling the diverse multilayer materials, is used the actual resistance value averaging in relation to the components of the composition. The aim of this work is a comparative analysis of known calculated dependences with experimental data when rolling the 100-layer samples. Objects of research were the 100-layer compositions based on the alternating layers of steel 08H18N10 and U8.

Experimental samples represented the vacuumized capsules with height, width, and length of 53 mm x 53 mm x 200 mm, respectively, in which there were the 100-layer packs from sheets, each of 0.5 mm, based on the composition of steels (U8+08H18N10). Rolling was made on the double-high mill with rolls of 160 mm in diameter during 19 passes to the thickness of 7 mm with the speed of 0,1 m/s. Relative sinking in each pass was accepted to be equal 10±2,5%. Rolling forces were measured by the strain-gauging method using the measuring cells, located under press screws of the mill. The oven thermocouple controlled a rolling temperature, and two pyrometers Optris CTlaser 3MH3 at the input and output parts of the mill made records.

Comparison of the rolling forces of the multilayer composition U8+08H18N10, which were received during experiment, with the calculated values, shows that with accumulative nature of deformations the real forces of rolling 1.5 – 2 times exceed the calculated values. The analysis of experimental data showed illegality of using the averagely proportional value of the flow limit to calculate the rolling forces of compositions with the large number of the alternating thin layers of various steels. For calculations of the rolling forces of such super-multilayer materials, a deformation resistance of each composition ought to be determined using the experimental data.

References

1. Kolesnikov A.G., Plokhikh A.I., Komissarchuk Yu.S., Mikhal'tsevich I.Yu. A study of special features of formation of submicro- and nanosize structure in multilayer materials by the method of hot rolling. *MiTOM (Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov)*, 2010, no. 6, pp. 44-49. (English translation: *Metal Science and Heat Treatment*, 2010, vol. 52, is. 5-6, pp. 273-278. DOI: 10.1007/s11041-010-9266-x).
2. Kolesnikov A.G., Plokhikh A.I., Mikhal'tsevich I.Yu. Investigation into opportunity for producing the submicro- and nanosize structures in multilayer materials by method of hot rolling. *Proizvodstvo prokata = Rolled Products Manufacturing*, 2010, no. 3, pp. 25-31. (in Russian).
3. Kolesnikov A.G., Plokhikh A.I. Metal Structural Materials with Submicro- and Nanodimensional Structures. *Vestnik MGTU im. N.E. Baumana. Ser. Priborostroenie = Herald of the Bauman MSTU. Ser. Instrument Engineering*, 2010, spec. is., pp. 44-52. (in Russian).
4. Shinkarev A.S., Kolesnikov A.G. Simulation of rolling multilayer composites based on dissimilar metals. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2011, no. 5. Available at: http://technomag.bmstu.ru/doc/191739.html , accessed 01.11.2014. (in Russian).
5. Kolesnikov A.G., Plokhikh A.I., Shinkarev A.S., Mironova M.O. Multilayer steel composition rolling peculiarities. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii*, 2013, no. 8, pp. 39-42. (in Russian).
6. Nikitin G.S. *Teoriya nepreryvnoy prodol'noy prokatki* [The theory of continuous longitudinal rolling]. Moscow, Bauman MSTU Publ., 2009. 399 p. (in Russian).
7. Tselikov A.I., Tomlenov A.D., Zyuzin V.I., Tret'yakov A.V., Nikitin G.S. *Teoriya prokatki* [Rolling theory]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1982. 335 p. (in Russian).
8. Golovanenko S.A. *Svarka prokatkoy bimetallov* [Bimetal welding by rolling]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1977. 160 p. (in Russian).
9. Charukhina K.E., Golovanenko S.A., Masterov V.A., Kazakov N.F. *Bimetallicheskie soedineniya* [Bimetallic compounds]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1970. 160 p. (in Russian).
10. Kobelev A.G., Lysak V.I., Chernyshov V.N., Bykov A.A., Vostrikov V.P. *Proizvodstvo sloistykh kompozitsionnykh materialov* [Production of layered composite materials]. Moscow, Intermet-Inzhiniring Publ., 2002. 496 p. (in Russian).