

УДК 621.771.2

Опыт прокатки многослойных листов на основе композиции сталей 08КП и У8

Шинкарев А. С.^{1,*}, Миронова М. О.¹,
Салманов Э. А.¹, Скачков С. Д.¹

*SHinkaryov@gmail.com

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

В работе исследуются механические свойства композиции сталей 08кп и У8, состоящей из 100 и 2500 чередующихся слоев, анализируется зависимость свойств от температуры нагрева перед прокаткой. Технология получения многослойных листов с устойчивой ультрамелкозернистой структурой основана на многократной горячей прокатке заготовки в виде композиции, состоящей из чередующихся металлических листов. Была проведена пакетная прокатка 100-слойной композиции сталей 08кп и У8 при различных температурах: 800°C, 900°C, 1000°C и 1100°C, с нагревом перед каждым проходом. Были определены температурные зависимости, которые могут быть использованы при расчетах сил прокатки. Для всех температур прокатки были получены изображения микроструктуры материала.

Ключевые слова: листовая пакетная прокатка, многослойные стальные материалы, температура деформации

Важной инженерной проблемой является повышение показателей эксплуатационных характеристик машиностроительных конструкций. Для создания новых типов конструкций, повышения надежности, увеличения ресурса работы, а также снижения металлоемкости изделий ведется разработка новых машиностроительных конструкционных материалов [1-3]. Одним из решений является создание супермногослойных стальных листовых материалов со *стабильной* ультрамелкозернистой структурой (размер зерен менее 1 мкм в одном из измерений).

Получение стального многослойного листового материала

Технология получения многослойных листов с устойчивой ультрамелкозернистой структурой основана на многократной горячей прокатке заготовки в виде композиции, состоящей из чередующихся металлических листов [4, 5]. В рамках данной работы объектом исследования являлась композиция сталей 08кп и У8 в виде листового проката толщиной 0,5 мм, уложенного в вакуумированный пакет. Производилась многопроходная прокатка пакета на стане ДУО 160 с дробной деформацией не более 10 % [6, 7]. Прокатка заготовок

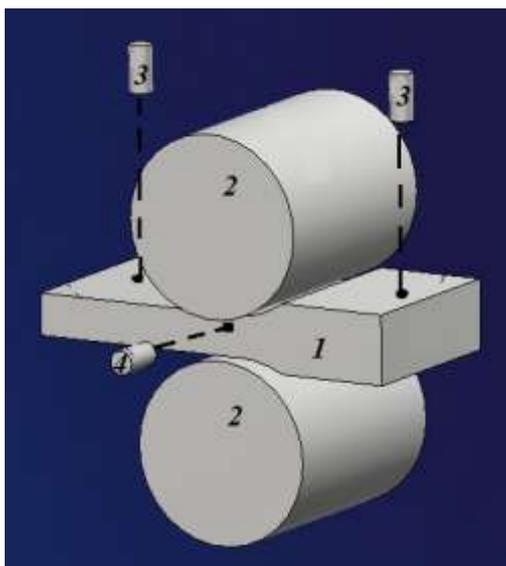
композиции сталей 08кп+У8 велась от толщины 53 мм до толщины 2 мм с нагревом заготовки до заданной температуры перед каждым проходом прокатки. Принципиальным условием реализации технологии получения многослойного прокатка с сохранением границ раздела слоев является существование при заданной температуре прокатки разных кристаллографических модификаций в соседствующих листах композиции [8]:

- при температуре деформации равной 800 °С сталь У8 имеет аустенитную структуру, сталь 08кп - ферритную,
- при температуре 900 °С сталь У8 находится в аустенитном состоянии, сталь 08кп – в аустенитно-ферритном;
- при 1000 °С и выше обе стали имеют аустенитную структуру.

Исследование температурных условий прокатки

Для выяснения реальных условий экспериментальной прокатки были проведены измерения температуры заготовки на всех стадиях ее обработки. Контроль температуры деформации при горячей прокатке осуществляли при помощи двух пирометров Optiris STlaser 3МНЗ по схеме, приведенной на рисунке 1 [9]. Пирометры устанавливались на входе и выходе клетки стана. При настройке пирометров коэффициент поглощения материала принимался равным 0,85. Для изучения температурных полей в очаге деформации применялся тепловизор Optiris PI, установленный перпендикулярно направлению проката вблизи очага деформации.

Режим нагрева в печи сопротивления задавался с помощью регулятора из расчета 1мм/мин от толщины нагреваемой заготовки и последующей 10-и минутной выдержки, контроль температуры осуществлялся термопарой, установленной на задней стенке печи. Потеря тепла за время транспортировки заготовки к моменту задачи ее в валки фиксировалась пирометром, установленным на входной стороне клетки.



1- заготовка; 2- валки; 3- пирометры; 4- тепловизор.

Рисунок 1. Схема измерения температуры прокатки.

На рисунке 2 представлен типовой график изменения температуры, получаемый при помощи инфракрасных пирометров. Перед прокаткой заготовка лежит на входном столе стана, этому моменту соответствует начальный участок температурной диаграммы, показывающий плавное остывание заготовки. Входу заготовки в валки и начальному моменту захвата заготовки соответствует участок провала показаний пирометра, следующий же за ним ровный участок соответствует установившемуся процессу прокатки. Пример изображения очага деформации, полученный с помощью тепловизора показан на рисунке 3. Измерение температуры позволило построить диаграмму изменения температур переднего и заднего конца полосы в зависимости от ее толщины (рисунок 4).

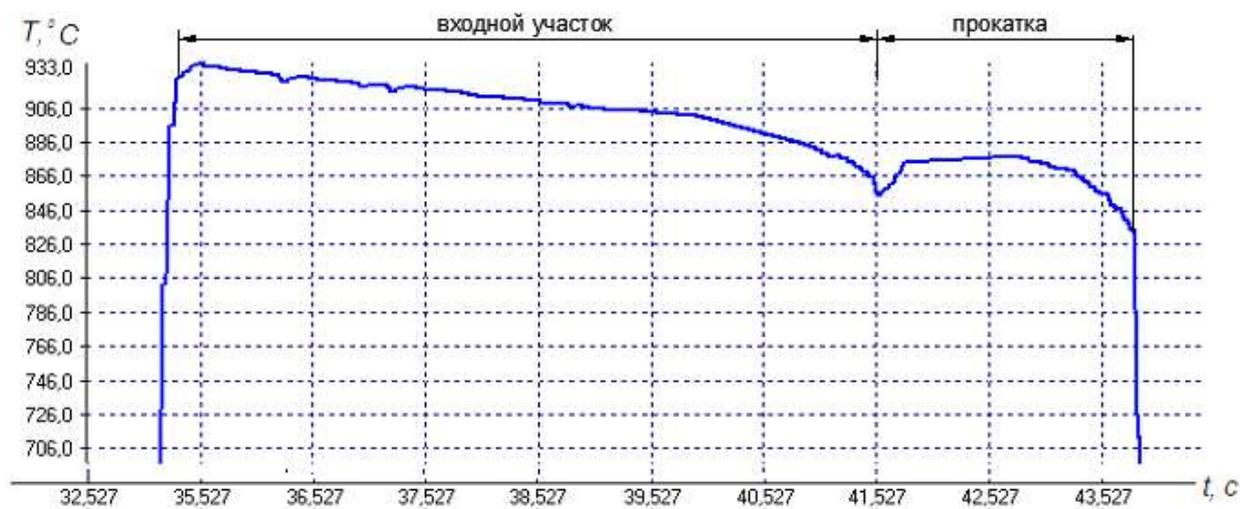


Рисунок 2. Типовой график измерения пирометром температуры на поверхности образца при входе в валки стана.

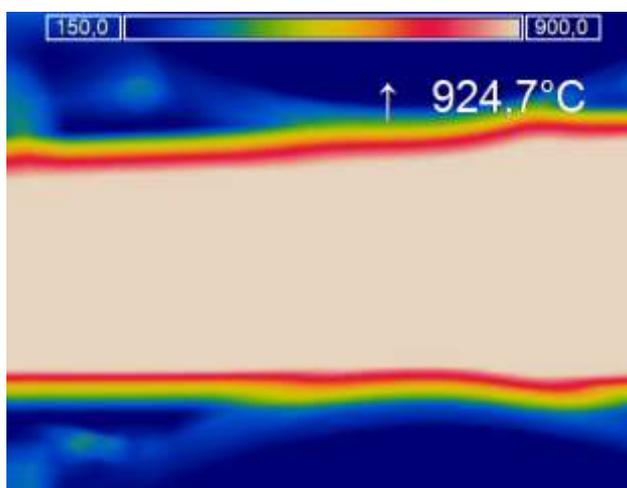


Рисунок 3. Типовое тепловизионное изображение очага деформации.

На графике изменения температуры можно выделить два характерных участка: температура заготовки при толщине от 7 до 50 мм остается примерно постоянной, на участке при толщине заготовки менее 7 мм отмечается резкое падение температуры. Таким образом, для поддержания температурного режима без применения на стане дополнительных теплоудерживающих устройств, прокатку целесообразно вести до толщины 20 мм.

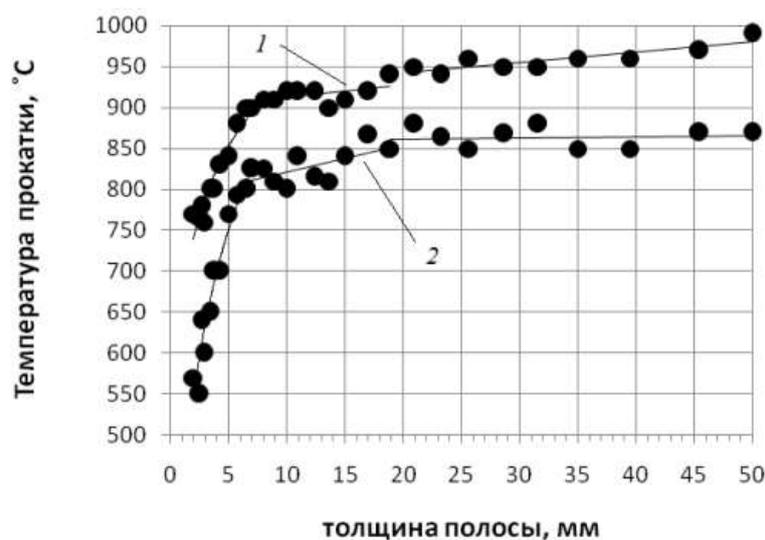


Рисунок 4. Зависимость температуры заготовки от ее толщины, полученная с помощью пирометров (исходная температура нагрева 1000 °C): 1 – на входе в стан, 2 – на выходе из валков

Были определены усредненные значения температуры деформации (рисунок 5), которые могут быть использованы при расчетах сил прокатки [9-11].

По результатам измерений была получена эмпирическая зависимость $T(h)$ для толщин от 7 до 50 мм в заданных условиях прокатки:

$$T = 1,53 \cdot h + 857,9 \quad (1)$$

Для получения слоистого материала с определенными механическими и физическими характеристиками необходим правильный подбор параметров прокатки (величины обжатия, скорости и температуры прокатки, а также геометрические параметры очага деформации).

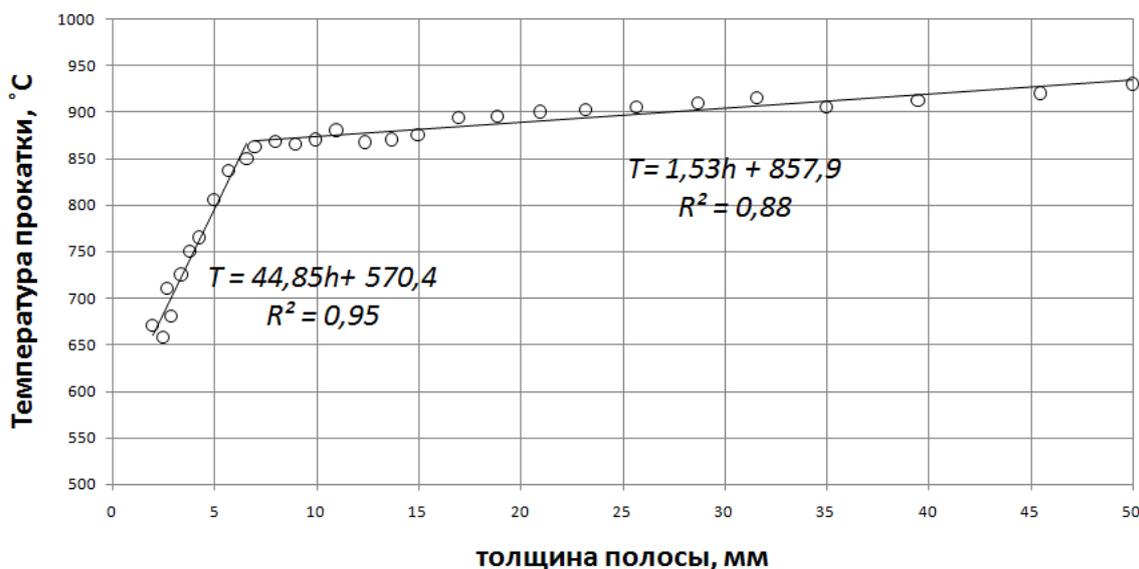
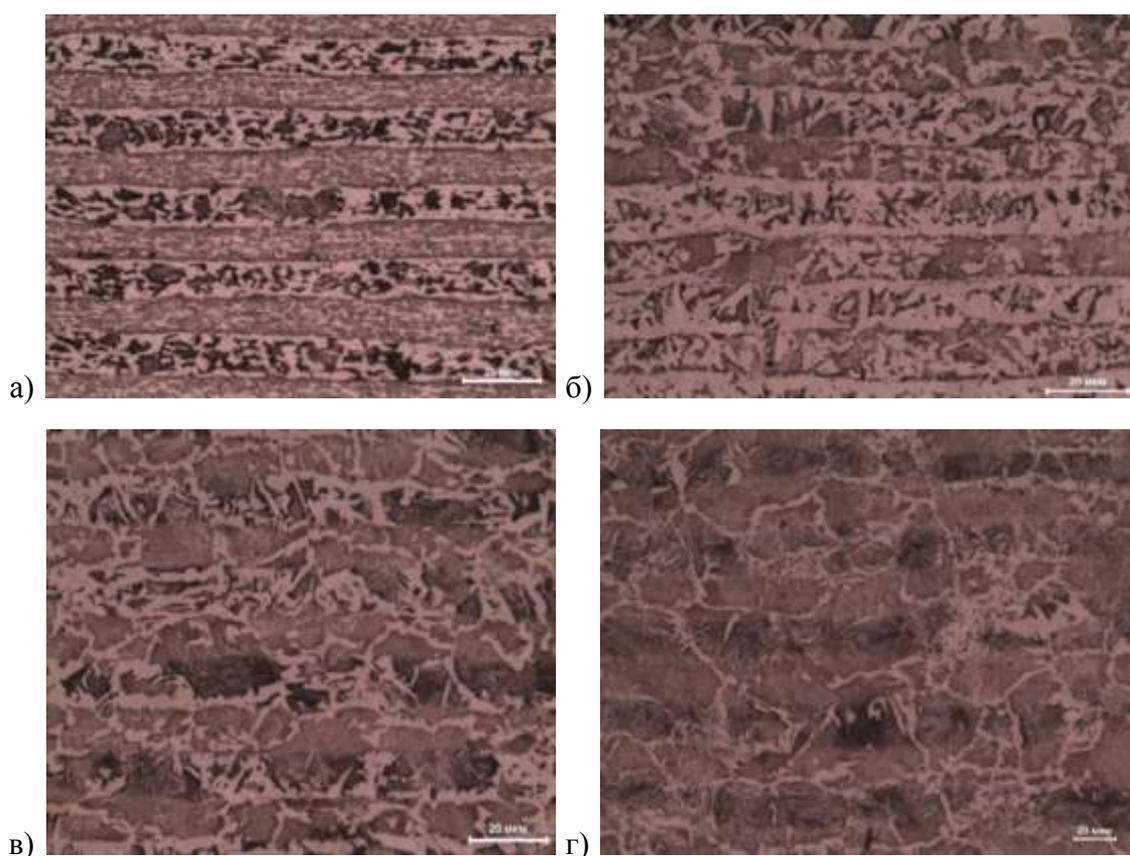


Рисунок 5. Средняя температура заготовки в зависимости от ее толщины.

Для определения температурной зависимости свойств 100-слойная композиция сталей 08кп и У8 прокатывалась при различных температурах нагрева заготовок: 800 °С, 900 °С, 1000 °С и 1100 °С (нагрев осуществлялся перед каждым проходом, величина деформации в каждом проходе составляла 10%, скорость прокатки 0,1 м/с). Для всех режимов прокатки были проведены микроструктурные исследования, полученные изображения микрошлифов приведены на рисунке 6.

Многослойный материал, прокатанный при температуре 800 °С, имеет мелкозернистое строение. При повышении температуры прокатки в ходе процесса диффузии происходит выравнивание химического состава слоев и изменение механических свойств получаемого материала, однако при этом мелкозернистое строение наследуется. Более подробно процесс диффузии углерода через межслойные границы из слоев стали У8 в слои стали 08кп и фазовые превращения, происходящие в данной композиции, исследуются в других публикациях [5]. Можно утверждать, что диффузия углерода идет с очень высокой скоростью и его перераспределение между слоями завершается к моменту прокатки заготовок от исходной толщины 50 мм до конечной толщины 10 мм. При этом несмотря на близкий химический состав структура слоев имеет существенное различие, разделение четко прослеживается для всех выбранных температурных условий прокатки.



Температуры нагрева: а) - 800 °С; б) - 900 °С; в) - 1000 °С; г) - 1100 °С.

Рисунок 6. Влияние температуры прокатки на структуру полученного композита на основе сталей 08кп и У8.

Механические свойства

На кафедре материаловедения МГТУ имени Н.Э. Баумана были проведены механические испытания на растяжение, использовалась универсальная испытательная машина ИР 5143-200 конструкции Точприбор. Образцы размерами 2x10x180 мм вырезались из многослойных полос вдоль направления проката. Испытывались образцы, прошедшие первый и второй переделы, т.е. один (100 слоев) и два цикла обработки (2500 слоев) со сборкой пакета. Толщина слоев после первого передела составила 20 мкм, после второго – 0,8 мкм. Результаты механических испытаний приведены в таблице 1.

Таблица 1. Сравнение механических свойств многослойной композиции 08кп+У8 при различных температурах прокатки.

Материал	Температура прокатки	Толщина слоя, мкм	$\sigma_{0,2}$	σ_B	δ	ψ
			МПа		%	
08кп+У8	800 °С	20	679	834	8,54	21,31
08кп+У8	900 °С	20	480	651	8,96	40,07
08кп+У8	1000 °С	20	439	618	10,94	28,36
08кп+У8	1100 °С	20	218	439,53	10	19,39
08кп+У8 2ой передел	1100 °С	0,8	492	688,2	5,63	7,17
У8	1100 °С	–	529,3	777,57	5	14,08
08кп	1000 °С	–	170	295	35	59

В соответствии с полученными данными можно утверждать, что с ростом температуры прокатки имеет место последовательное падение временного сопротивления и предела текучести слоистого материала, при этом удлинение материала остается примерно постоянным. Наилучшими прочностными свойствами обладает стальной многослойный материал, полученный прокаткой при температуре 800 °С. После прохождения двух циклов многопроходной прокатки (два передела со сборкой пакета) от 53 мм до 2 мм материал имеет 2500 слоев и толщину слоя 0,8 мкм. Такой материал, прокатанный при температуре 1100 °С, обладает свойствами отличными от материала, имеющего 100 слоев и продеформированного при той же температуре. Проведение второго цикла прокатки для композита, содержащего 2500 слоев, при температуре 800 °С предположительно должно обеспечить дальнейшее повышение его прочностных свойств.

На рисунке 7 приведены результаты измерения модуля упругости многослойной композиции (08кп+У8), содержащей 100 слоев и прокатанной при температуре 800 °С, и исходных материалов. Для наглядного сравнения механических свойств построены столбчатые диаграммы, отражающие величину предела прочности и относительного удлинения.

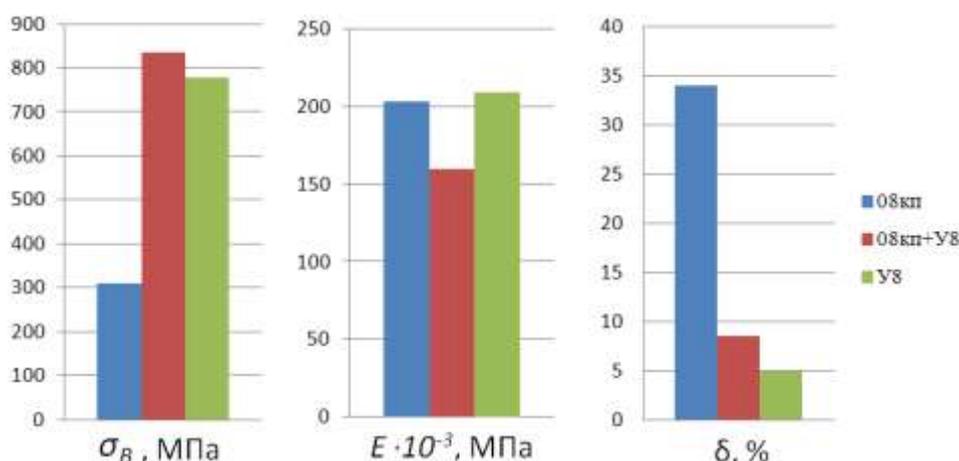


Рисунок 7. Сравнение механических свойств композиции сталей 08kp+У8, содержащей 100 слоев и прокатанной при температуре 800 °С, и исходных материалов.

По результатам сравнения механических свойств многослойных композитов, прошедших один цикл обработки, и исходных материалов видно:

- увеличение предела прочности композиции 08kp+У8 по сравнению со сталью 08kp на 170%, со сталью У8 на 10%;
- увеличение предела текучести композиции 08kp+У8 по сравнению со сталью У8 на 30%;
- снижение модуля упругости на 30%.

Заключение

Проведенные исследования показывают, что многослойный композиционный материал на основе низкоуглеродистой и высокоуглеродистой сталей (08kp+У8), получаемый пакетной прокаткой по технологии, разработанной в МГТУ имени Н.Э.Баумана, обладает свойствами отличными от свойств исходных материалов. В ходе многопроходной прокатки в многослойном материале происходит накопление остаточных напряжений. Режимы деформации подбираются таким образом, чтобы обеспечить сохранение границ раздела между слоями, которые препятствуют движению дислокаций и способствуют изменению свойств материала в целом. Как показали испытания механических свойств, значения их показателей существенно зависят от выбранной температуры деформации, а также от степени накопленной деформации и толщины слоев. В ходе работы наилучшие прочностные свойства были получены после прокатки при температуре 800 °С. Дальнейшего изучения требуют особенности формирования механических свойств в ходе прохождения второго цикла прокатки, которому соответствует большая степень суммарной накопленной деформации.

Перспективным является применение многослойных стальных материалов различных композиций для производства полотен ленточных пил, элементов гибких тяговых органов, длинноходовых глубинных насосных установок, материалов для изготовления уп-

ругих элементов, а также материалов бронезащиты. При этом актуальной задачей является подбор оптимальных условий деформации и термообработки таких материалов для повышения их механических свойств.

Список литературы

1. Быков Ю.А., Карпухин С.Д. Способы получения конструкционных наноматериалов. Часть 1 // Наноинженерия. 2012. № 6. С. 11-19.
2. Колесников А.Г., Шинкарев А.С. Анализ способов измельчения структуры при получении металлических конструкционных материалов // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 11. С. 34-44. DOI: [10.7463/1114.0738880](https://doi.org/10.7463/1114.0738880)
3. Matlock D.K. et al. Microstructural Simulations via Thermal Processing of Roll Bonded Steel Laminates // International Journal of Metallurgical Engineering. 2013. Vol. 2, № 1. С. 10-17.
4. Колесников А.Г., Мечиев Ш.Т., Панова И.Ю. Состояние и перспективы применения многослойных металлических заготовок // Заготовительные производства в машиностроении. 2008. № 1. С. 42-43.
5. 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 // Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallorv. 2010. № 6. С. 44-49.
6. Арюлин С.Б., Халипов И.В. Получение многослойных композиционных материалов методом горячей прокатки // Заготовительные производства в машиностроении. 2013. № 7. С. 31-35.
7. 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.
8. Плохих А.И., Чан Юэ, Карпухин С.Д. Исследование влияния межслойного диффузионного перераспределения углерода на ударную вязкость многослойных материалов // Известия ВолгГТУ. 2015. № 8. С. 86-91.
9. Шинкарев А.С. Разработка процесса прокатки многослойных стальных листов: автореф. ... дис. канд. техн. наук. М.: 2015. 16 с.
10. Колесников А.Г., Плохих А.И., Шинкарев А.С. Измерение сил прокатки супермногослойных стальных материалов и определение зависимости сопротивления деформации от параметров процесса // Наука и образование. МГТУ им. Н.Э. Баумана. Электрон. журн. 2014. № 12. С. 1-11. DOI: [10.7463/1214.0739772](https://doi.org/10.7463/1214.0739772)
11. 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.

Rolling of Multilayer Composition Based on High-Carbon and Low-Carbon Steels

A.S. Shinkaryov^{1,*}, M.O. Mironova¹,
E.A. Salmanov¹, S.D. Skachkov¹

*SHinkaryov@gmail.com

¹Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russia

Keywords: multilayer steel materials, ultrafinestructure, plate rolling, rolling temperature

The paper studies mechanical properties of high-carbon and low-carbon steel compositions, consisting of 100 and 2500 interstratifying layers and analyses the properties versus the heating temperature before rolling. A process of multilayer sheets with stable ultrafine structure is based on multiple hot rolled billets, as a composition, consisting of interstratifying sheets of steel. The requirement to implement the multi-layer rolling technology is the existence of different crystallographic modifications at a given temperature of rolling:

- at deformation temperature of 800°C a low-carbon steel (U8) has an austenitic structure and a high-carbon steel (08KP) has a ferrite one;
- at temperature of 900°C the U8 steel is in the austenitic state and the 08KP steel - in austenitic-ferrite one;
- at 1000 ° C and higher, both steels have an austenitic structure.

In the course of the work was involved pack rolling of 100- layer composition of U8 and 08KP steels at various temperatures, namely 800°C, 900°C, 1000°C and 1100°C, with heating before each pass. To determine the real conditions of an experimental rolling were taken temperature measurements of the billet at all stages of its treatment by means of pyrometer Optris CTlaser 3MH3 and thermal Optris PI. The averaged values of deformation temperature, which can be used in calculation of rolling force, were determined. For all rolling temperatures the material microstructure images were obtained.

The multilayer material obtained has a fine grain structure. The multilayer steel material produced by rolling at 800 ° C has the best strength properties. Studies show that the multi-layer composite material based on low-carbon and high-carbon steels (08KP + U8) has properties different from those of the raw materials. The promising use is multilayer steel materials of various compositions to produce band saw blades, flexible traction elements, long-stroke deep pumpsets, materials to manufacture elastic elements, and materials of armour protection as well.

References

1. Bykov Yu.A., Karpukhin S.D. Methods of manufacturing of constructional nanomaterials. Part I. *Nanoinzheneriya = Nano Engineering*, 2012, no. 6, pp. 11-19. (in Russian).
2. Kolesnikov A.G., Shinkarev A.S. Analysis of metal structure refinement methods in creating metal engineering materials // *Nauka i obrazovanie. MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2014, no. 11, pp. 34-44. (in Russian). DOI: [10.7463/1114.0738880](https://doi.org/10.7463/1114.0738880)
3. Matlock D.K. et al. Microstructural simulations via thermal processing of roll bonded steel laminates. *International Journal of Metallurgical Engineering*, 2013, vol. 2, no. 1, pp. 10-17.
4. Kolesnikov A.G., Mechiev Sh.T., Panova I.Yu. Future trends of multi-layer metallic blanks. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii = Blanking Productions in Mechanical Engineering*, 2008, no. 1, pp. 42-43. (in Russian).
5. 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. *Metallovedenie i termicheskaya obrabotka metallov*, 2010, no. 6, pp. 44-49. (in Russian). (English version of journal: *Metal science and heat treatment*, 2010, vol. 52, no. 5, pp.273–278. DOI: [10.1007/s11041-010-9266-x](https://doi.org/10.1007/s11041-010-9266-x))
6. Aryulin S.B., Khalipov I.V. Preparation of multilayer composite materials by hot rolling. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii = Blanking Productions in Mechanical Engineering*, 2013, no. 7, pp. 31-35. (in Russian).
7. Kolesnikov A.G., Plokhikh A.I., Shinkarev A.S., Mironova M.O. Multilayer steel composition rolling peculiarities // *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii = Blanking Productions in Mechanical Engineering*, 2013, no. 8, pp. 39-42. (in Russian).
8. Plokhikh A.I., Chan Yue, Karpukhin S.D. Research on impact of inter-layer carbon diffusion redistribution on impact viscosity of multilayer materials. *Izvestiya VolgGTU = Izvestia VSTU*, 2015, no. 8, pp. 86-91. (in Russian).
9. Shinkarev A.S. *Razrabotka protsessa prokatki mnogosloynnykh stal'nykh listov: avtoref. dis. kand. tekhn. nauk* [Process development of multilayer steel sheets rolling: cand. tech. sci. diss]. Moscow, 2015. 16 p. (in Russian).
10. Kolesnikov A.G., Plokhikh A.I., Shinkarev A.S. Multilayer steel materials deformation resistance and roll force measurement. *Nauka i obrazovanie MGTU im. N.E. Baumana = Science and Education of the Bauman MSTU*, 2014, no. 12, pp. 1-11. (in Russian). DOI: [10.7463/1214.0739772](https://doi.org/10.7463/1214.0739772)
11. Kolesnikov A.G., Plokhikh A.I., Shinkarev A.S., Mironova M.O. Prokatka stal'nogo mnogosloynnogo materiala. *Zagotovitel'nye proizvodstva v mashinostroenii = Blanking Productions in Mechanical Engineering*, 2013, no. 8, pp. 39-42. (in Russian).