

## References

1. Brunauer S. Adsorption of gases and vapors. Moscow: Foreign Literature Publishing House, 1948, 768 p.
2. Freundlich H. Colloid and capillary chemistry, 1926, 108 p.
3. Fialkov A.S. *Uglegrafitovye materialy* [Graphitized carbon materials]. Moscow: Energiya, 1979, 320 p.
4. Shulepov S. V. *Fizika uglerodnykh materialov* [Physics of carbon materials]. Chelyabinsk: Metallurgiya, Chelyabinsk Section, 1990, 336 p.
5. Samodurova M.N., Barkov L.A., Mymrin S.A. et al. Phenomenology of powder densification of composite materials based on tungsten and carbon. *Metallurg*, 2013, no. 10. pp. 76–84.
6. Antsiferov V. N., Bobrov G. V., Druzhinin L. K. et al. *Poroshkovaya metallurgiya i napylennye pokrytiya* [Powder metallurgy and sprayed coatings]. Moscow: Metallurgiya, 1987, 792 p.
7. Mymrin S.A., Barkov L.A., Chaplygin B.A. et al. A method for extrusion of bars of refractory metal powders and a die for their compacting. Patent of the Russian Federation no. 2381870, IPC B22F3/02. Application 2007149830/02 dated 19.11.2007. Published on 20.02.2010. Bulletin no. 5.
8. Samodurova M.N., Ivanov V.A., Barkov L.A. A method for pressing carbon contact strips for trolley buses. Patent of the Russian Federation no. 2494835, IPC B22F3/02. Application 2012128703/02 dated 09.07.2012. Published on 10.10.2013. Bulletin no. 28.
9. Barkov L.A., Mymrin S.A., Chaplygin A.B. et al. An apparatus for molding preforms from refractory metal powders. Patent of the Russian Federation no. 2373025, IPC B22F3/02. Application 2008108606/02 dated 04.03.2008. Published on 20.11.2009. Bulletin no. 32.
10. Samodurova M.N., Ivanov V.A., Barkov L.A. et al. A die for molding powders. Useful model patent of the Russian Federation no. 121762, IPC B22F3/03. Application 2012125863/02 dated 20.06.2012. Published on 10.11.2012. Bulletin no. 31.
11. Samodurova M.N., Ivanov V.A., Barkov L.A. et al. A die for molding powders. Useful model patent of the Russian Federation no. 120591, IPC B22F3/03. Application 2012118025/02 dated 02.05.2012. Published on 27.09.2012. Bulletin no. 27.
12. Samodurova M.N., Barkov L.A., Ivanov V.A. A die for pressing powder compositions based on carbon. Useful model patent of the Russian Federation no. 137489, IPC B22F3/03. Application 2013137998 dated 13.08.2013. Published on 20.02.2014. Bulletin no. 5.

УДК 621.746+621.771

## ИССЛЕДОВАНИЕ СОВМЕЩЕННОГО ПРОЦЕССА НЕПРЕРЫВНОГО ЛИТЬЯ И ДЕФОРМАЦИИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА БИМЕТАЛЛИЧЕСКИХ ПОЛОС

Лехов О.С.<sup>1</sup>, Турлаев В.В.<sup>2</sup>, Лисин И.В.<sup>1</sup>, Туев М.Ю.<sup>1</sup><sup>1</sup> Российский государственный профессионально-педагогический университет, г. Екатеринбург.<sup>2</sup> ООО «Уральский дизель-моторный завод», г. Екатеринбург.

**Аннотация.** Изложены преимущества и определены основные параметры технологии производства биметаллических полос на установке совмещённого процесса непрерывного литья и деформации. Приведены результаты теплового расчёта совмещённого процесса непрерывного литья и деформации при получении биметалла сталь-медь.

**Ключевые слова:** биметалл сталь-медь, совмещённый процесс, непрерывное литьё и деформация, температурное поле, сборный кристаллизатор.

### Введение

Возрастающие потребности промышленности в биметаллах вызвали необходимость создания принципиально новых процессов их производства с целью повышения производительности, расширения сортамента и улучшения качества биметаллических полос. В работах [1,2] отмечается, что разработаны технологии холодного плакирования широкого класса биметаллов: сталь + медные сплавы, сталь + алюминиевые сплавы, сталь + никелевые сплавы, которые находят широкое применение в электронной, электротехнической, автомобильной, оборонной промышленности. К основным технологическим задачам в развитии этих процессов относятся увеличение ширины биметаллических листов, производимых рулонным методом, а также по-

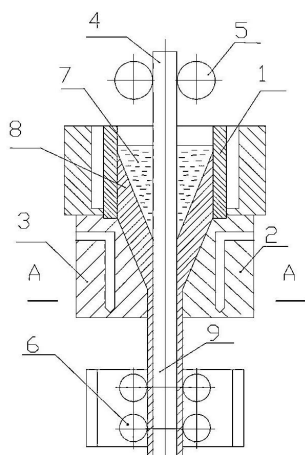
лучение биметалла с повышенной толщиной плакировочных слоев (до 10–15% от толщины основного слоя).

### Технические и технологические разработки

Проблемы производства биметаллических листов могут быть решены с использованием принципиально новой установки совмещённого процесса непрерывного литья и деформации [3]. Разработана ресурсосберегающая технология производства биметаллических полос [4] на установке совмещённого процесса непрерывного литья и деформации (рис. 1).

Предлагаемая технология непрерывного литья и деформации биметаллической полосы [4] включает подачу в неразъемный кристаллизатор металла плакировочного слоя (например, сплав алюминия) в жидком состоянии и предусматри-

вает в разъемной части сборного кристаллизатора соединение полосы второго металла (сталь) в твердом состоянии с кристаллизующейся оболочкой плакировочного слоя путем обжатия с высокой степенью деформации с последующей калибровкой биметаллической полосы.



**Рис. 1. Способ получения биметаллической полосы:** 1 – неразъемный кристаллизатор; 2, 3 – стенки-бойки разъемного кристаллизатора; 4, 5 – направляющие ролики; 6 – тянущие ролики; 7 – расплав металла плакирующего слоя; 8 – оболочка плакирующего металла; 9 – полоса основного металла

Следует отметить, что скорость непрерывного литья, равная скорости прохождения полосы основного металла через неразъемный кристаллизатор, определяется заданной толщиной плакировочного слоя. Таким образом, предлагаемый способ предусматривает пропускание полосы основного металла через расплав металла плакировочного слоя, который подается в водоохлаждаемый неразъемный кристаллизатор, с последующей деформацией стенками-бойками затвердевшего биметаллического слитка.

Основные преимущества предлагаемой технологии:

- повышение качества биметалла за счёт обжатия стенками-бойками биметаллического слитка обеспечивает надёжное сваривание слоёв, получение мелкозернистой однородной структуры металла плакировочного слоя, хорошего качества поверхности полосы и высокой точности толщины плакировочного слоя;

- расширение сортамента биметаллических полос;

- повышение производительности процесса непрерывного литья и деформации биметаллических полос.

Определим соотношение между скоростью прохождения биметаллической полосы  $v_1$  и толщиной корочки  $\delta$  металла плакировочного слоя.

Толщина корочки

$$\delta = k\sqrt{\tau}, \quad (1)$$

где  $k$  – коэффициент кристаллизации,  $\frac{м}{мин^{1/2}}$ ;  $\tau$  – время кристаллизации, мин.

$$\tau = \frac{H}{v_1}, \quad (2)$$

где  $H$  – высота расплава металла в неразъемном кристаллизаторе, м.

В результате толщина корочки

$$\delta = k\sqrt{\frac{H}{v_1}}. \quad (3)$$

Отсюда

$$v_1 = k^2 \cdot H / \delta^2, \text{ м / мин} \quad (4)$$

Следует отметить, что толщина корочки  $\delta$  биметаллического слитка, выходящего из неразъемного кристаллизатора, определяется заданной толщиной плакировочного слоя и степенью его деформации стенками-бойками, обеспечивающей надёжное сваривание слоёв биметалла.

Для оценки новой технологии производства биметаллических полос было определено напряженно-деформированное состояние металла плакирующего слоя в очаге деформации при получении биметалла сталь-алюминий. Для расчета использован пакет ANSYS [5]. Значения модуля упругости и упрочнения и предела текучести для алюминия марки А5 определены зависимостью от температуры металла [6]. Материал плакировочного слоя в очаге деформации испытывает упругопластические деформации, которые достигают конечных значений. При исследовании напряженно-деформируемого состояния биметаллической полосы при деформации пренебрегли инерционными и массовыми силами, деформируемый металл считаем несжимаемым. При записи уравнений состояния использован случай простого нагружения. Для материала плакировочного слоя принята упругопластическая модель Прандля-Рейса. Так как задача сложная, то приняты изотермические условия деформации, т.е. разогрев деформируемого материала стенок-бойков не учитывается. Принимается, что трение на всей поверхности контакта подчиняется закону сухого трения Кулона, причём коэффициент трения постоянен на всей контактной поверхности.

Толщина полосы из стали принята равной 5 мм. Температура ее 300 град. Температура алюминия – 600 град. Толщина слоя алюминия на стальной по-

лосе принималась равной 0,5 мм. Коэффициент трения между стальной полосой и слоем алюминия принят равным 1,0, а между алюминием и стенкой-бойком – 0,1. Толщина оболочки  $\sigma$  плакирующего слоя из алюминия  $\sigma = 3$  мм, скорость вытягивания оболочки с жидкой фазой из неразъемного кристаллизатора  $v_1 = 8$  м/мин (рис. 2).

Расчетная схема процесса показана на рис. 2. При расчете со стороны внутренней поверхности очага деформации задавались статические граничные условия в виде ферростатического давления, равного 0,01 МПа.

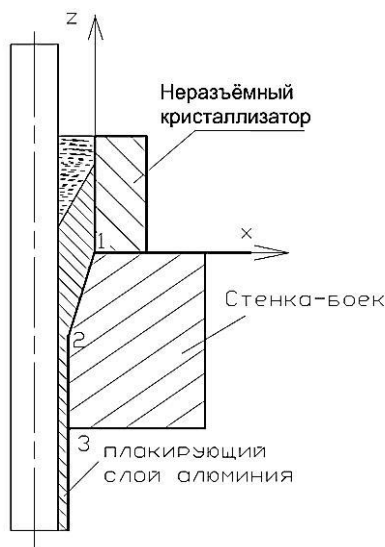


Рис. 2. Расчётная схема совмещённого процесса непрерывного литья и деформации при получении биметалла сталь-алюминий

На внешней поверхности очага деформации из алюминия принимаем температуру равной 530°C. Для этой температуры модуль упругости – 1088 МПа, модуль упрочнения – 0,163 МПа и предел текучести – 12,3 МПа. Для стенки-бойка модуль упругости принят равным 210 ГПа, а коэффициент Пуассона – 0,3. Коэффициент Пуассона для очага деформации принят равным 0,35.

Результаты получены решением задачи механики сплошной среды методом конечных элементов. Конкретно: использована объемная постановка контактной задачи теории упругопластичности при наличии больших деформаций и перемещений. Для стенки-бойка задавались перемещения, равные 5 мм, в направлениях, противоположных положительным направлениям осей X и Z. Величина подачи стенками-бойками биметаллической полосы за один цикл обжата – 28 мм, угловая скорость вращения эксцентриковых валов – 71 об./мин.

В качестве конечного элемента ис-

пользован двадцатиузловой объемный твердотельный конечный элемент SOLID 95 [1]. Размер элемента находился в диапазоне – от 0,5 до 1 мм. В нашем случае для моделирования совмещенного процесса непрерывного литья и деформации при получении биметалла и определения напряженного состояния плакировочного слоя использован статический нелинейный анализ. Одним из способов получения нелинейного решения является разбиение нагрузки на шаги и подшаги. При этом количество шагов и подшагов следует задавать таким образом, чтобы обеспечить требуемую точность расчета и сходимости решения задачи.

При моделировании совмещенного процесса при получении биметалла и определении напряженного состояния плакировочного слоя непрерывного литья и деформации весь процесс был разбит на 90 шагов, поскольку деформация полосы происходит на угле поворота эксцентриковых валов 90 град. Пилотному узлу на каждом шаге задавалось кинематическое граничное условие в виде поворота эксцентриковых валов на угол, равный одному градусу. На каждом шаге (угле поворота эксцентриковых валов) полоса перемещалась и деформировалась за счет сил трения между полосой и перемещающейся стенкой-бойком сборного кристаллизатора. Для обеспечения сходимости и необходимой точности расчета каждый шаг разбивался на 1500 подшагов. Выбор такого количества подшагов обусловлен тем, что на каждом подшаге решения приращение пластических деформаций не должно превышать 5%.

Результаты расчета напряженно-деформированного состояния металла плакирующего слоя из алюминия в очаге деформации представлены в виде эпюр напряжений. Приняты следующие основные обозначения:  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  – напряжения в направлении осей X, Y, Z соответственно.

На рис. 3 представлены закономерности распределения нормальных напряжений вдоль оси X и на рис. 4 – касательных напряжений.

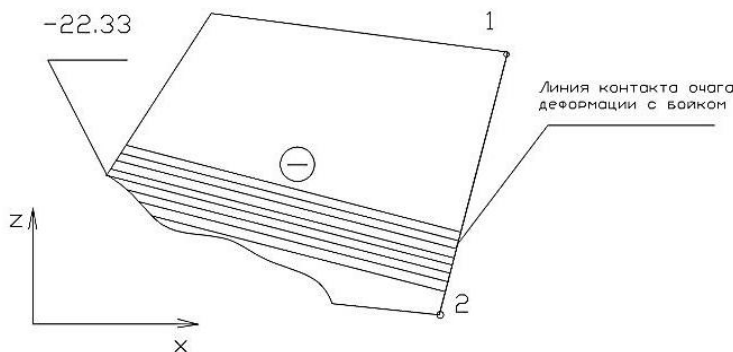
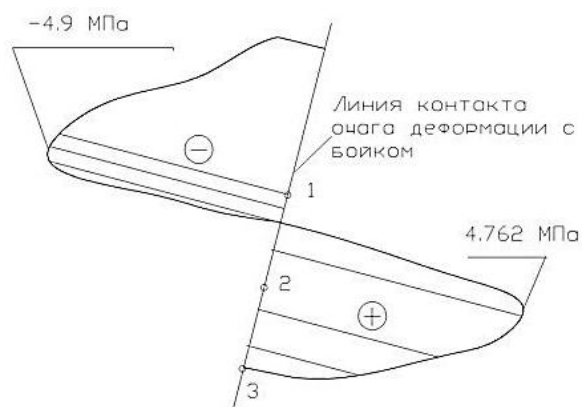


Рис. 3. Характер напряжения по оси X вдоль линии 1-2 очага деформации



**Рис. 4. Характер касательных напряжений вдоль линии 1-2-3 очага деформации**

Положение точек смотри на **рис. 2**.

В **табл. 1** приведены выборочные результаты по максимальным напряжениям по поверхности контакта плакировочного слоя в зоне очага деформации со стенкой-бойком.

**Таблица 1**

**Выборочные результаты по максимальным напряжениям (МПа) по поверхности контакта очага деформации со стенкой-бойком**

$\sigma_x$	$\sigma_y$	$\sigma_z$	$\sigma_{zx}$
-22	-12	-16	-5

\* Знак (-) означает, что напряжения на контактной поверхности биметаллической полосы со стенкой-бойком сжимающие.

Представленные результаты свидетельствуют о благоприятной схеме напряженного состояния в очаге деформации при получении биметалла сталь-алюминий. Как следует из представленных эпюр напряжений, металл плакирующих слоев находится практически в условиях всестороннего сжатия. Таким образом, циклическая деформация биметаллической полосы с высоким уровнем сжимающих напряжений на контакте ее со стенкой-бойком сборного кристаллизатора обеспечивает интенсивную пластическую деформацию плакирующих слоев из алюминия, что способствует надежному свариванию слоев и получению мелкозернистой структуры плакировочного слоя из алюминия. В **табл. 2** представлены выборочные результаты по перемещениям металла плакировочного слоя в направлении оси Z для точек 1–3, показанных на **рис. 2**.

Представленные результаты свидетельствуют о том, что при деформации затвердевший металл плакировочного слоя не выдавливается в конус жидкой фазы, а перемещается в направлении непрерывного литья и деформации. При интенсивной циклической деформации стенками-бойками биметаллической полосы перемещение плакиро-

вочных слоев из алюминия относительно основной стальной полосы будет способствовать разрушению окисных пленок и прочному сцеплению компонентов биметалла.

**Таблица 2**

**Значения перемещений металла в направлении оси Z**

Номер точки	Перемещения ( $u_z$ , мм)
1	-1,6
2	-15,3
3	-22,3

Для оценки новой технологии производства биметаллических полос и оценки качества биметалла проведены экспериментальные исследования на лабораторной установке при получении биметалла сталь-алюминий. В процессе эксперимента в кристаллизатор заливали расплав алюминия и одновременно через него пропускали стальную полосу толщиной 5 мм. В разъемной части кристаллизатора кристаллизующиеся корочки плакирующего слоя соединяли с основной полосой по всему ее периметру и подвергали циклической деформации подвижными стенками-бойками с последующей калибровкой.

Расстояние между рабочими поверхностями калибрующего участка кристаллизатора было равно 6 мм, поэтому толщина плакирующего слоя составила 0,5 мм и при этом получена хорошая поверхность биметаллической полосы.

Большим преимуществом предлагаемой технологии получения биметалла в сравнении с существующими является то, что она позволяет получить плакирующий слой одинаковой толщины по всему периметру основной полосы. Это особенно важно при получении биметалла типа сталь-медь и т.п. для электротехнической промышленности.

В процессе эксперимента установлено, что надежность сцепления слоев биметалла и качество поверхности биметаллической полосы хорошие.

### Заключение

Предложен и обоснован принципиально новый совмещенный процесс непрерывного литья и деформации для производства биметаллических полос. Внедрение в производство установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации позволит создать ресурсосберегающие технологические процессы, существенно повысить производительность, расширить сортамент и повысить качество непрерывных биметаллических полос.

### Список литературы

- Кузнецов Е.В., Кобелев А.Г. Биметаллы: современные технологии и применение // Пластическая деформация сталей и сплавов: сб. науч. трудов. М.: МИСиС, 1996. С. 296-302.

2. Кузнецов Е.В. Основные направления развития технологии производства биметаллов // Теория и технология процессов пластической деформации: труды науч.-техн. конференции. М.: МИСиС, 1997. С. 111–119.
3. Пат. 2077407 РФ. Способ непрерывного литья заготовок и устройство для его осуществления / О.С. Лехов // БИ. 2000. №5.
4. Пат. 2064364 Россия. Способ получения биметаллической полосы / О.С.Лехов.
5. ANSYS. Structural analysis Guide. Rel.6.0. <http://www.cadfern.ru>
6. Лехов О.С., Комратов Ю.С. Совмещённые процессы непрерывного литья и деформации для производства проката. Екатеринбург: УГТУ-УПИ, 2009.

#### INFORMATION ABOUT THE PAPER IN ENGLISH

### THE PRODUCTION OF BIMETALLIC STRIPS WITHIN A COMBINED CONTINUOUS CASTING AND DEFORMATION PROCESS

**Lekhov Oleg Stepanovich** – D.Sc. (Eng.), Professor, Head of the Mechanics Department, Russian State Professional Pedagogical University, Ekaterinburg, Russia. Phone: +7 343 341 79 40.

**Lisin Ilya Vyacheslavovich** – Engineer, Russian State Professional Pedagogical University, Ekaterinburg, Russia. Phone: +7 343 371 88 00.

**Turlaev Valery Vasilievich** – Chief Engineer, LLC Ural Diesel Engine Plant, Ekaterinburg, Russia.

**Tuev Mikhail Yurievich** – Associate Professor, Russian State Professional Pedagogical University, Ekaterinburg, Russia. Phone: +7 343 370 24 93.

**Abstract.** This article presents advantages and determines key parameters of the bimetallic strip production process at a combined continuous casting and deformation machine. A thermal design of the combined continuous casting and deformation process during production of steel-copper bimetal is given.

**Keywords:** steel-copper bimetal, combined process, continuous casting and deformation, thermal field, composite mould.

#### References

1. Kuznetsov E.V., Kobelev A.G. Bimetals: modern technologies and application. *Plasticheskaya deformatsiya staley i splavov: sb. nauch. trudov* [Plastic deformation of steel and alloys: collection of research papers]. Moscow: MISiS, 1996, pp. 296-302.
2. Kuznetsov E.V. Key guidelines of development of a bimetal production process. *Teoriya i tekhnologiya protsessov plasticheskoy deformatsii: trudy nauch.-tekhn. konferentsii* [Theory and technology of plastic deformation processes: collection of research papers]. Moscow: MISiS, 1997, pp. 111–119.
3. Lekhov O.S. A billet continuous casting method and a machine for its application. Patent RF, no. 2077407. 2000.
4. Lekhov O.S. A bimetallic strip production method. Patent RF, no. 2064364.
5. ANSYS. Structural analysis Guide. Rel.6.0. <http://www.cadfern.ru>
6. Lekhov O.S., Komratov Yu.S. *Sovmeshchennyye protsessy nepryvnogo litya i deformatsii dlya proizvodstva prokata* [Combined continuous casting and deformation processes for rolled products]. Ekaterinburg: USTU-UPI, 2009.