

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

© 2015 г. О.С. Лехов, И.В. Лисин

Российский государственный профессионально-педагогический университет (РГППУ), г. Екатеринбург

*Статья поступила в редакцию 11.04.14 г., доработана 10.02.15 г., подписана в печать 16.07.15 г.*

Приведены результаты исследования нового совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для получения биметаллических полос. Предложена методика расчета параметров технологического процесса и установки для производства биметаллических полос. Определены напряжения в очаге деформации металла плакировочного слоя при получении биметалла сталь–алюминий. Для оценки новой технологии и качества биметалла проведены экспериментальные исследования получения на опытной установке биметалла сталь–алюминий.

**Ключевые слова:** биметалл, плакирование, сталь, алюминий, совмещенный процесс, непрерывное литье, деформация, кристаллизатор, стенка-бок, напряжение, конечный элемент, модуль, структура металла.

**Лехов О.С.** — докт. техн. наук, профессор кафедры автомобилей и подъемно-транспортных машин РГППУ (620012, г. Екатеринбург, ул. Машиностроителей, 11). E-mail: MXLehov@yandex.ru.

**Лисин И.В.** — соискатель ученой степени канд. техн. наук РГППУ. E-mail: liv\_41@mail.ru.

**Для цитирования:** Лехов О.С., Лисин И.В. Установка совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для производства биметаллических полос // Изв. вузов. Цвет. металлургия. 2015. No. 6. С. 30–35.

DOI: [dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2015-6-30-35](http://dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2015-6-30-35).

*Lekhov O.S., Lysin I.V.*

### *An installation for the combined continuous casting and deformation for the production of bimetallic strips*

The results of studying a new combined process of continuous casting and deformation for manufacturing bimetallic strips are presented. A procedure for calculating parameters of the manufacturing process and installation for the production of bimetallic strips is proposed. Stresses in the deformation region of metal of the cladding layer when producing steel–aluminum bimetal are determined. To evaluate a new manufacturing technology of bimetallic strips and bimetal quality, experimental investigations of fabricating steel–aluminum bimetal using a pilot installation are performed.

**Keywords:** bimetal, cladding, steel, aluminum, combined process, continuous casting, deformation, crystallizer, wall-face, finite element, module, metal structure.

**Lekhov O.S.** — Dr. Sci. (Eng.), Prof., Department of Vehicles and Handling Machines, Russian State Vocational Pedagogical University (RSVPU) (Russia, 620012, Ekaterinburg, Mashinostroiteley str., 11). E-mail: MXLehov38@yandex.ru.

**Lysin I.V.** — Competitor for academic degree of Cand. Sci., RSVPU. E-mail: liv\_41@mail.ru.

**Citation:** Lekhov O.S., Lysin I.V. Ustanovka sovmeshchennogo protsesssa nepreryvnogo lit'ya i deformatsii dlya proizvodstva bimetallicheskih polos. *Izv. vuzov. Tsvet. metallurgiya*. 2015. No. 6. P. 30–35. DOI: [dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2015-6-30-35](http://dx.doi.org/10.17073/0021-3438-2015-6-30-35).

## Введение

Основное направление развития цветной металлургии на современном этапе — создание принципиально новых процессов и установок, позволяющих существенно снизить расходы топлива и электроэнергии, капитальные и эксплуатационные затраты, а также улучшить качество металлопродукции. Широкое применение в различных областях техники находят биметаллы. Их использование позволяет достичь не только качественно новых свойств изделий, но и существенной экономии до-

рогостоящих материалов и прежде всего цветных металлов [1–6].

Возрастающие потребности в биметаллах и требования к улучшению их качества вызвали необходимость создания высокопроизводительных процессов их производства. В работе [1] 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 отраслях промышленности. К основным технологическим задачам в развитии этих процессов относятся увеличение ширины биметаллических листов, производимых рулонным методом, а также получение биметалла с повышенной толщиной лакировочных слоев (до 10—15 % от толщины основного слоя).

Таким образом, целью настоящей работы являлись определение параметров технологического процесса и установки для производства биметаллических полос, а также исследование напряженно-деформированного состояния в очаге деформации металла лакирующего слоя при получении биметалла сталь—алюминий.

### Технология производства биметаллических полос

Изложенные выше проблемы производства биметаллических листов могут быть успешно решены с использованием принципиально новой установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации (НЛД) [7—9]. Разработана и запатентована [10] ресурсосберегающая технология производства биметаллических полос на установке совмещенного процесса непрерывного литья и деформации (рис. 1). Она включает подачу в неразъемный кристаллизатор металла лакировочного слоя в жидком состоянии (например, сплава алюминия) и предусматривает в разъемной части сборного кристаллизатора соединение полосы второго металла (стали) в твердом состоянии с кристаллизующейся оболочкой лакирующего слоя путем обжатия с высокой степенью деформации и последующей калибровкой биметаллической полосы (см. рис. 1). Следует отметить, что скорость непрерывного литья, равная скорости прохождения полосы основного металла через неразъемный кристаллизатор, определяется заданной толщиной лакирующего слоя.

Таким образом, предлагаемый способ предусматривает пропускание полосы основного металла через расплав металла лакирующего слоя, который подается в водоохлаждаемый неразъемный кристаллизатор, с последующей деформацией стенками-бойками затвердевшего биметаллического слитка.

Основные преимущества предлагаемой технологии:

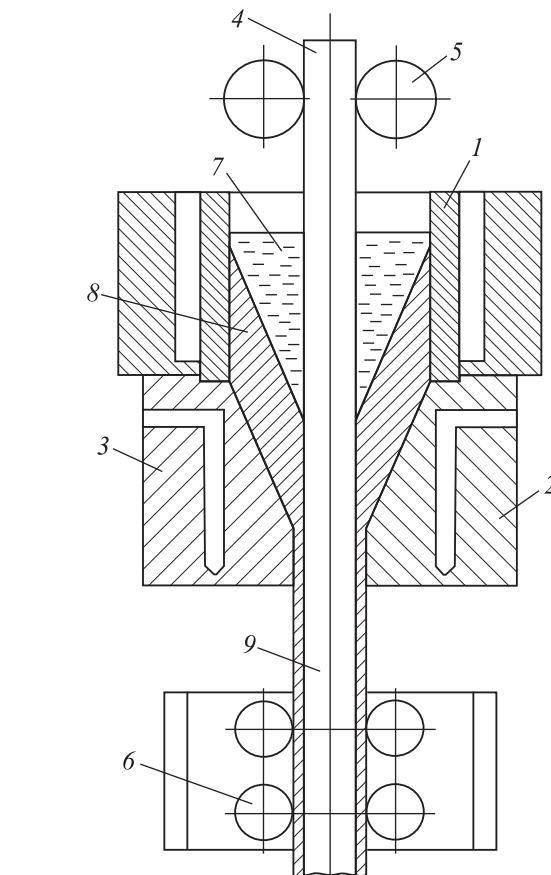


Рис. 1. Способ получения биметаллической полосы

1 — неразъемный кристаллизатор; 2, 3 — стенки-бойки разъемного кристаллизатора; 4, 5 — направляющие ролики; 6 — тянущие ролики; 7 — расплав металла лакирующего слоя; 8 — оболочка лакирующего металла; 9 — полоса основного металла

- повышение качества биметалла за счет обжатия стенками-бойками биметаллического слитка с высокой степенью деформации, что обеспечивает надежное сцепление слоев и получение мелкозернистой однородной структуры металла лакирующего слоя;

- расширение сортамента биметаллических полос;

- повышение производительности процесса непрерывного литья и деформации биметаллических полос за счет получения их за один проход и в одной установке.

### Параметры установки НЛД

Определим соотношение между скоростью прохождения биметаллической полосы ( $v_1$ , м/мин) и толщиной корочки ( $\delta$ , м) металла лакирующего слоя. Величина  $\delta$  находится по формуле

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

где  $k$  — коэффициент кристаллизации;  $\tau$ , мин — время кристаллизации, равное

$$\tau = H/v_1, \quad (2)$$

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

Подставив (2) в уравнение (1), получим

$$\delta = k\sqrt{H/v_1}, \quad (3)$$

отсюда

$$v_1 = k^2 H / \delta^2. \quad (4)$$

Следует отметить, что толщина корочки биметаллического слитка, выходящего из неразъемного кристаллизатора, определяется заданной толщиной плакирующего слоя и степенью его деформации стенками-бойками, обеспечивающей надежное сцепление слоев биметалла.

Длина неразъемного кристаллизатора равна

$$l_1 = v_1 \tau + l_0, \quad (5)$$

где  $l_0$  — величина кристаллизатора, определяемая на основании экспериментальных данных.

Длина стенок-бойков разъемной части сборного кристаллизатора определяется по формуле

$$l_2 = \frac{H_0 - h}{2 \operatorname{tg} \alpha}, \quad (6)$$

где  $H_0$  — высота оболочки плакирующего слоя, мм;  $h$  — толщина биметаллической полосы, мм;  $\alpha$  — угол наклона рабочей поверхности стенки-бойка, град.

Величина подачи ( $S$ , мм) биметаллического слитка стенками-бойками кристаллизатора составит

$$S = e / \operatorname{tg} \alpha, \quad (7)$$

где  $e$  — величина эксцентриситета эксцентриковых валов, мм.

Частота вращения ( $n$ , об/мин) эксцентриковых валов установки будет равна

$$n = \frac{v_1 \cdot 10^3}{S}. \quad (8)$$

Мощность приводного электродвигателя установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации [7] находится по уравнению

$$N = \frac{0,105 P n e}{2 \eta}, \quad (9)$$

где  $P$  — сила деформации, кН;  $\eta$  — коэффициент полезного действия линии привода.

### Методика расчета напряженно-деформированного состояния

Для оценки новой технологии производства биметаллических полос было определено напряженно-деформированное состояние металла плакирующего слоя в очаге деформации при получении биметалла сталь—алюминий [8, 9].

Толщина полосы из стали принята равной 5 мм, ее температура — 300 °С. Толщина слоя алюминия на стальной полосе была 0,5 мм, а его температура — 600 °С. Коэффициент трения между стальной полосой и слоем алюминия составлял 1,0, а между алюминием и стенкой-бойком — 0,1. Толщина оболочки плакирующего слоя из алюминия  $\sigma = 3$  мм, а скорость вытягивания оболочки с жид-

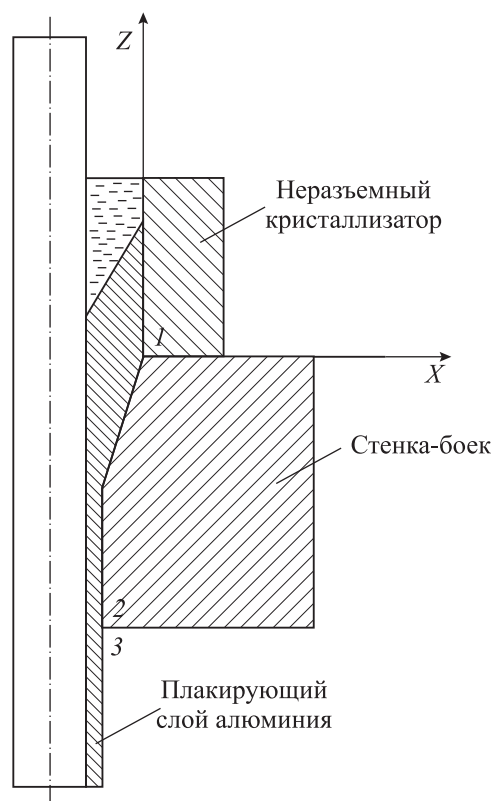


Рис. 2. Расчетная схема совмещенного процесса непрерывного литья и деформации при получении биметалла сталь—алюминий

кой фазой из неразъемного кристаллизатора  $v_1 = 8$  м/мин.

Расчетная схема процесса НЛД показана на рис. 2. При расчете со стороны внутренней поверхности очага деформации задавались статические граничные условия в виде ферростатического давления, равного 0,01 МПа. На внешней поверхности плакирующего слоя из алюминия температура была 530 °С. При этой температуре модуль упругости алюминия  $E = 1088$  МПа, модуль упрочнения  $E_1 = 0,163$  МПа и предел текучести  $\sigma_T = 12,3$  МПа; для стенки-бойка приняты  $E = 210$  ГПа и коэффициент Пуассона  $\nu = 0,3$ ; для плакирующего слоя  $\nu = 0,35$ .

Результаты расчета получены решением задачи механики сплошной среды методом конечных элементов [11–15], а именно: использована объемная постановка контактной задачи теории упруго-пластичности при наличии больших деформаций и перемещений. Для стенки-бойка задавались перемещения, равные 5 мм, в направлениях, противоположных положительным направлениям осей  $X$  и  $Z$ .

В качестве конечного элемента использован 20-узловой объемный твердотельный конечный элемент SOLID 95 [8] размером от 0,5 до 1 мм.

### Обсуждение результатов

Результаты расчета напряженно-деформированного состояния металла плакирующего слоя из алюминия в очаге деформации представлены в виде эпюр напряжений  $\sigma_x$ ,  $\sigma_y$ ,  $\sigma_z$  в направлении осей  $X$ ,  $Y$  и  $Z$  соответственно.

На рис. 3 и 4 представлены закономерности распределения нормальных и касательных напряжений. Выборочные результаты по максимальным напряжениям ( $\sigma$ , МПа) по поверхности контакта плакирующего слоя в зоне очага деформации со стенкой-бойком приведены ниже:

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

Отрицательные значения напряжений означают, что на контактной поверхности биметаллической полосы со стенкой-бойком они сжимающие.

Полученные данные свидетельствуют о благоприятной схеме напряженного состояния в очаге деформации при изготовлении биметалла сталь—

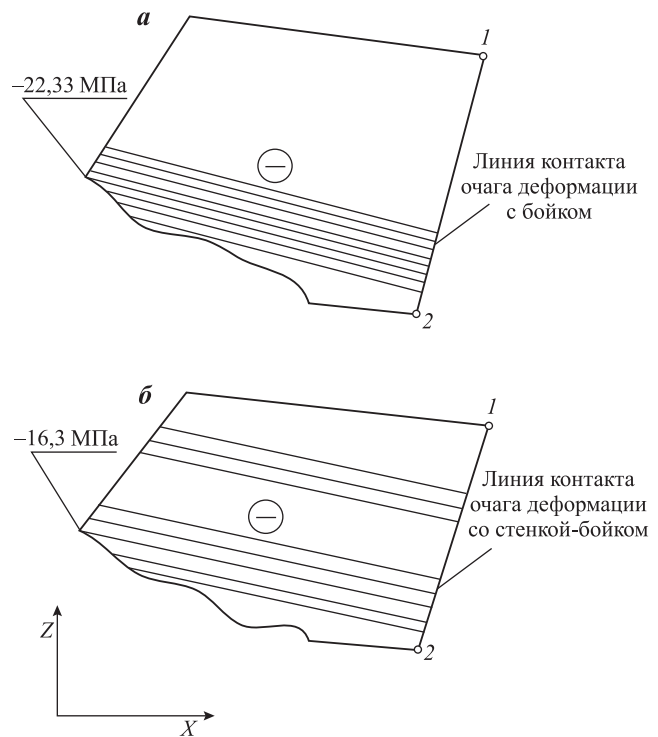


Рис. 3. Характер напряжения по осям  $X$  (а) и  $Z$  (б) вдоль линии 1–2 (см. рис. 2) очага деформации

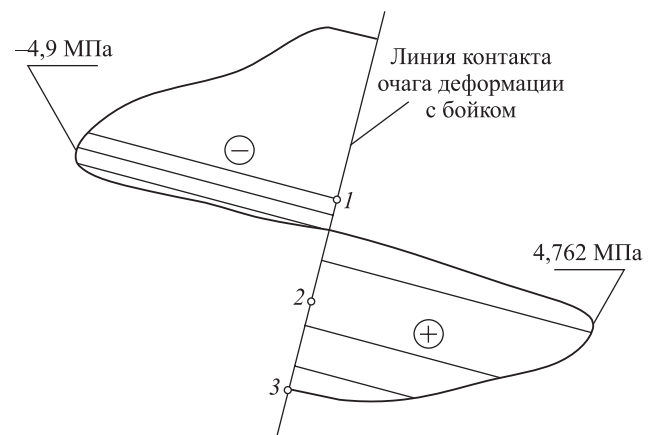


Рис. 4. Характер касательных напряжений вдоль линии 1–2–3 (см. рис. 2) очага деформации

алюминий. Как следует из представленных эпюр напряжений (см. рис. 3 и 4), металл плакирующих слоев находится практически в условиях всестороннего сжатия. Таким образом, циклическая деформация биметаллической полосы с высоким уровнем сжимающих напряжений на ее контакте со стенкой-бойком сборного кристаллизатора обеспечивает интенсивную пластическую деформацию плакирующих слоев из алюминия, что способствует их на-

дежному сцеплению и получению мелкозернистой структуры плакирующего Al-слоя.

## Экспериментальное исследование

Для оценки новой технологии производства биметаллических полос и качества биметалла проведены экспериментальные исследования качества поверхности и прочности сцепления слоев биметалла сталь—алюминий на лабораторной установке. В ходе 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.

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

## Заключение

Предложен и обоснован принципиально новый метод непрерывного литья и деформации для получения биметаллических полос. Внедрение в производство установки совмещенного процесса непрерывного литья и деформации позволит создать ресурсосберегающие технологии, существенно увеличить производительность, расширить сортамент и повысить качество непрерывных биметаллических полос.

## Литература

- Кузнецов Е.В., Кобелев А.Г. Биметаллы: современные технологии и применение // Пластическая деформация сталей и сплавов: Сб. науч. тр. М.: Изд-во МИСиС, 1996. С. 296—302.
- Кузнецов Е.В. Основные направления развития технологии производства биметаллов // Теория и технология процессов пластической деформации: Сб. тр. науч.-техн. конф. М.: Изд-во МИСиС, 1997. С. 111—119.
- Король В.К., Гильденгорн М.С. Основы технологии производства многослойных металлов. М.: Metallurgia, 1970.
- Кобелев А.Г., Потапов И.Н., Кузнецов Е.В. Технология слоистых металлов. М.: Metallurgia, 1991.
- Кузнецов Е.В. Металлические композиции. М.: Metallurgia, 1992.
- Стулов В.В., Одинокоев В.И. Исследование получения непрерывно-литых кованных армированных заготовок // Изв. вузов. Чер. металлургия. 1997. No. 2. С. 20—22.
- Лехов О.С. Способ непрерывного литья заготовок и устройство для его осуществления: Пат. 2077407 (РФ). 2000.
- Лехов О.С., Комратов Ю.С. Совмещенные процессы непрерывного литья и деформации для производства проката. Екатеринбург: УГТУ—УПИ, 2009.
- Лехов О.С., Комратов Ю.С., Туев М.Ю. Исследование совмещенного процесса непрерывного литья и деформации для получения листа из алюминия // Производство проката. 2009. No. 6. С. 41—43.
- Лехов О.С. Способ получения биметаллической полосы: Пат. 2064364 (РФ). 2000.
- ANSYS. Structural analysis Guide. Rel.6.0. <http://www.cadfern.ru>
- Оден Дж. Конечные элементы в нелинейной механике сплошных сред. М.: Мир, 1976.
- Галлагер Р. Метод конечных элементов. М.: Мир, 1984.
- Зенкевич О., Морган К. Конечные элементы и аппроксимация. М.: Мир, 1986.
- Норри Д., Фриз Ж. Введение в метод конечных элементов. М.: Мир, 1981.

## References

- Kuznetsov E.V., Kobelev A.G. Bimetal: sovremenniy tekhnologii i primeneniye. In: *Plasticheskaja deformacija staley i splavov* [Bimetals: modern technologies and application. In: *Plastic deformation staly and alloys*]. Moscow: MISiS, 1996. P. 296—302.
- Kuznetsov E.V. Osnovniye napravleniya razvitiya tekhnologii proizvodstva bimetallov. In: *Teoria i tekhnologia processov plasticheskoi deformacii* [The principal directions of development technology of the production bimetals. In: *Theory and technology of processes of plastic deformation*]. Moscow: MISiS, 1997. P. 111—119.

3. Korol V.K., Gildengorn M.S. Osnoviy tekhnologii proizvodstva mnogosloinukh metallov [The basis technology of the production multilayer metals]. Moscow: Metallurgia, 1970.
4. Kobelev A.G., Potapov I.N., Kuznecov E.V. Tekhnologia sloistiykh metallov [The technology of the layered metals]. Moscow: Metallurgiya, 1991.
5. Kuznecov E.V. Metallicheskie kompozicii [The metall compositions]. Moscow: Metallurgia, 1992.
6. Stulov V.V., Odinokov V.I. Issledovanie polucheniya neprerivnolitykh kovannykh armirovannykh zagotovok [Research receipt continuously cast reinforced forged blanks]. *Izv. vuzov. Cher. metallurgia*. 1997. No. 2. P. 20—22.
7. Lekhov O.S. Sposob neprerivnogo litia zagotovok i ystroistvo dlia ego osuchhestvleniya [Method of continuous casting of ingots and installation for it realization]: Pat. 2077407 (RF). 2000.
8. Lekhov O.S., Komratov Yu.S. Sovmechhenniye processiy neprerivnogo litia i deformacii dlia proizvodstva prokata [The combined processes of continuous casting and deformation for production the rolled metal]. Ekaterinburg: UGTU—UPI, 2009.
9. Lekhov O.S., Komratov Yu.S., Tuev M.Yu. Issledovanie sovmehhennogo processa neprerivnogo litia i deformacii dlia polucheniya lista iz aluminiya [Investigation of the combined process of continuous casting and deformation for obtaining the sheet from aluminum]. *Proizvodstvo prokata*. 2009. No. 6. P. 41—43.
10. Lekhov O.S. Sposob polucheniya bimetallicheskoj polosiy [Method of obtaining the bimetall strip]: Pat. 2064364 (RF). 2000.
11. ANSYS. Structural analysis Guide. Rel.6.0.<http://www.cadfern.ru>
12. Oden D. Konechniye elementiy v nelineinoi mekhanike sploshnykh sred [Finite elements in nonlinear continuum mechanics]. Moscow: Mir, 1976.
13. Gallager R. Metod konechnykh elementov [Method of finite elements]. Moscow: Mir, 1984.
14. Zenkevich O., Morgan K. Konechniye elementiy i aproksimatsiya [Finite element and approximation]. Moscow: Mir, 1986.
15. Norri D., Friz G. Vvedenie v metod konechnykh elementov [The introduction in method of finite elements]. Moscow: Mir, 1981.