

УДК 621.77.014:669

Бондаренко С. В.
Гридин А. Ю.
Шапер М.

ИССЛЕДОВАНИЕ ЗАВИСИМОСТИ ТЕМПЕРАТУРЫ И СТЕПЕНИ ДЕФОРМАЦИИ ТОНКИХ УЧАСТКОВ ПРОФИЛИРОВАННЫХ ПОЛОС ПРИ ВАЛКОВОЙ РАЗЛИВКЕ-ПРОКАТКЕ С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ТЕПЛОВЫМ СОПРОТИВЛЕНИЕМ

Полосы с гетерогенными свойствами занимают одну из инновационных позиций в различных отраслях промышленности. Так, в автомобилестроении все больше начинают применять полосы с профилированным поперечным сечением при изготовлении различных элементов кузовов и других частей автомобиля. Это, прежде всего, вызвано попытками совместить в производимых моделях автомобилей высокую безопасность и комфорт, а также возможность изготовления более экологичных автомобилей. Это возможно достичь лишь путем уменьшения веса элементов конструкции, что, в свою очередь, приведет к уменьшению потребления топлива и, соответственно, уменьшению количества вредных выбросов в атмосферу.

В современном мире полосы с различными механическими свойствами разделяют по способу производства на несколько групп. К этим группам относятся:

- Tailor Welded Blank (TWB) – полосы произведенные путем сварки встык нескольких полос из различных материалов и/или различной толщины;
- Patchwork blanks – разновидность полос, по способу производства похожи на TWB, однако, в данном случае, производится приваривание одной полосы к поверхности другой;
- Tailored Rolled Blanks – полосы с профилированным поперечным сечением, которые производятся путем прокатки;
- Tailored Heat Treated Blanks – полосы постоянной толщины, однако имеющие различные механические свойства на различных участках, что достигается путем различных режимов термообработки.

Все вышеназванные способы получения различных характеристик в одной полосе обладают как достоинствами, так и недостатками. Основным общим недостатком этих технологий являются большие энергетические затраты и, как следствие, высокая стоимость производства [1].

Также, в последнее время, все отрасли промышленности стремятся к уменьшению затрат на производство и последующую эксплуатацию как экономических, так и экологических ресурсов. В связи с этим все больше исследовательских работ посвящено поиску новых материалов и изучению возможности использования уже известных материалов в новых областях. Так, различные алюминиевые сплавы все больше находят применение при изготовлении различных элементов конструкций, в частности, в автомобилестроении. Различные алюминиевые сплавы используют для изготовления элементов кузовов и корпусов автомобилей. Некоторыми автомобилестроительными компаниями, такими как Audi, Jaguar, BMW и другие, были выпущены прототипы и серийные автомобили с кузовом полностью из алюминия и его сплавов.

Однако, наряду с поиском новых материалов, промышленность также ищет и дорабатывает уже существующие технологии производства. Одной из таких технологий, которая в последнее десятилетие показала себя очень хорошо, является технология валковой разливки-прокатки. Данный процесс известен с XIX века, но популярность обрел лишь в последние десятилетия. За этот период в промышленности он показал ряд своих преимуществ и хорошо себя зарекомендовал для производства полос как из алюминия и его сплавов, так и из различных сталей. Из алюминиевых сплавов, путем валковой разливки-прокатки, получают моно- и биметаллические полосы.

В 2011 году сотрудниками института пластической деформации металлов в г. Аахене (ФРГ) была опубликована первая работа, посвященная получению полос с профилированным поперечным сечением путем валковой разливки прокатки из стали 1.4301, отечествен-

ным аналогом которой является сталь 08X18H9. Конструктивной особенностью, представленной в работе агрегата бесслитковой прокатки, является использование с целью придания поверхности валков-кристаллизаторов необходимого профиля, слоя никеля, нанесенного на валки-кристаллизаторы. Этот слой в последующем был подвержен механической обработке. Позже, в 2014 году, теми же исследователями была опубликована статья, посвященная исследованию влияния последующей прокатки в профилированных валках на механические свойства и качество получаемых полос [2–3].

Основными недостатками описанной выше технологии получения профилированных полос является необходимость использования для каждого нового профиля поперечного сечения получаемой полосы, дорогостоящего никеля и сама длительность изготовления валков-кристаллизаторов. Также авторами в данных работах не было представлено информации о влиянии дополнительного теплового сопротивления на границе металл-валок на ряд параметров получаемых полос, в частности, на степень деформации и на температуру тонкого участка профилированной полосы на выходе из валков-кристаллизаторов.

Авторами в данной работе рассматривается альтернативный способ профилирования поверхности водоохлаждаемых валков-кристаллизаторов, а именно, применение одной или нескольких стальных профилирующих лент, что позволяет существенно упростить перенастройку агрегата на желаемый тип профиля. Данная профилирующая лента охватывает один или оба валка-кристаллизатора (в зависимости от желаемого вида профиля) [4].

Схематически, данное решение представлено на рис. 1.



Рис. 1. Схематическое изображение способа профилирования поверхности бандажей валков-кристаллизаторов при помощи стальной профилирующей ленты

Однако, для получения полос высокого качества, при использовании данного способа профилирования необходимо учитывать, что использование стальной ленты, как инструмента для профилирования поверхности валков-кристаллизаторов, повышает тепловое сопротивление на границе металл-валок в этой области, что приводит к изменению условий охлаждения расплава в ходе протекания процесса кристаллизации и последующей прокатки.

Авторами в работе рассматривается участок зоны кристаллизации-деформации, соответствующий тонкому участку получаемой профилированной полосы. Целью данной работы является теоретический анализ влияния толщины используемой стальной профилирующей ленты на температуру и степень деформации тонкого участка профилированной полосы, который проходил через валки-кристаллизаторы в области влияния дополнительного теплового сопротивления. Полученные результаты позволят разработать технологию получения профилированных в поперечном сечении полос высокого качества методом валковой разливки-прокатки.

Для анализа влияния дополнительного теплового сопротивления, которое обусловлено применением стальной профилирующей ленты, в рамках данного исследования применялся программный пакет Ansys Flotran американской компании Ansys Inc. Для этого использовалась двумерная модель, которая хорошо себя зарекомендовала при проведении расчетов по влиянию технологических параметров на степень деформации получаемой плоской

полосы, а также показала хорошие результаты в ходе сравнения результатов, полученных при компьютерном моделировании и проведении физических экспериментов [5–8]. Внешний вид используемой модели представлен на рис. 2.

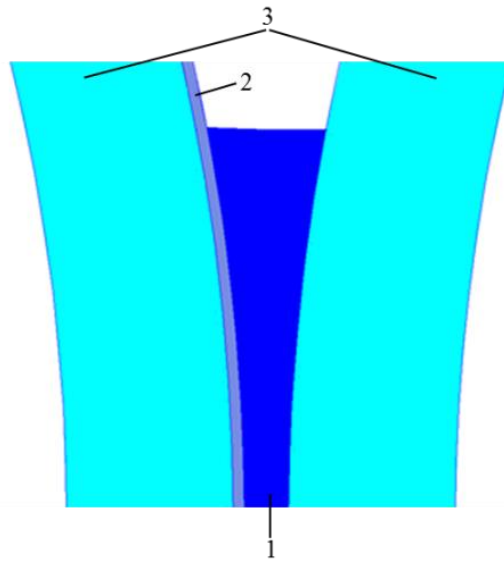


Рис. 2. Внешний вид двумерной модели валковой разливки-прокатки с применением стальной профилирующей ленты в среде Ansys Flotran (1 – зона кристаллизации-деформации, 2 – стальная профилирующая лента, 3 – бандажи водоохлаждаемых валков-кристаллизаторов)

В качестве материала в модели использовался алюминиевый сплав EN AW-1050 со следующими физическими свойствами: плотность разливаемого материала – 2700 кг/м^3 , теплопроводность разливаемого металла – $200 \text{ Вт/м}^2\text{К}$, удельная теплоемкость разливаемого металла – 880 Дж/кгК , температура солидус – 930 К , температура ликвидус – 919 К . Материалом бандажей валков-кристаллизаторов и профилирующей ленты является сталь со следующими физическими свойствами: плотность – 7800 кг/м^3 , теплопроводность – $35 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ и $32 \text{ Вт/м}^2\text{К}$ соответственно, удельная теплоемкость – 462 Дж/кгК .

Технологические параметры проведения процесса валковой разливки-прокатки, которые использовались в ходе компьютерного моделирования, были взяты приближенными к экспериментальным. Толщина применяемой стальной ленты варьировалась от $0,25 \text{ мм}$ до $1,0 \text{ мм}$ с шагом $0,25 \text{ мм}$. Толщина алюминиевой полосы изменялась от $1,0 \text{ мм}$ до $4,0 \text{ мм}$ с шагом $0,5 \text{ мм}$. Высота зоны кристаллизации-деформации (ванны расплава) задавалась равной 25 мм , 35 мм и 60 мм .

Целью серии моделирований в конечно-элементной среде Ansys Flotran было изучение влияния толщины применяемой профилирующей стальной ленты на температуру тонкого участка профилированной полосы на выходе из валков-кристаллизаторов для разных высот зоны кристаллизации-деформации. Примеры полученных в результате моделирований зависимостей, для алюминиевых полос толщиной 1 мм и 4 мм , представлены на рис. 3.

Из графиков видно, что при валковой разливке-прокатке полос с наличием дополнительного теплового сопротивления, температура алюминиевой полосы растет при увеличении ее толщины. То есть, при бесслитковой прокатке полос с профилированным поперечным сечением температура тонких участков данных полос будет расти вне зависимости от толщины используемой профилирующей ленты. Однако, даже для высоты зоны кристаллизации-деформации равной 25 мм и толщине тонкого участка профилированной полосы равного 4 мм , данная температура не превышает нижней границы, а именно температуры ликвидус. Это гарантирует полную кристаллизацию расплава и формирование полноценной полосы.

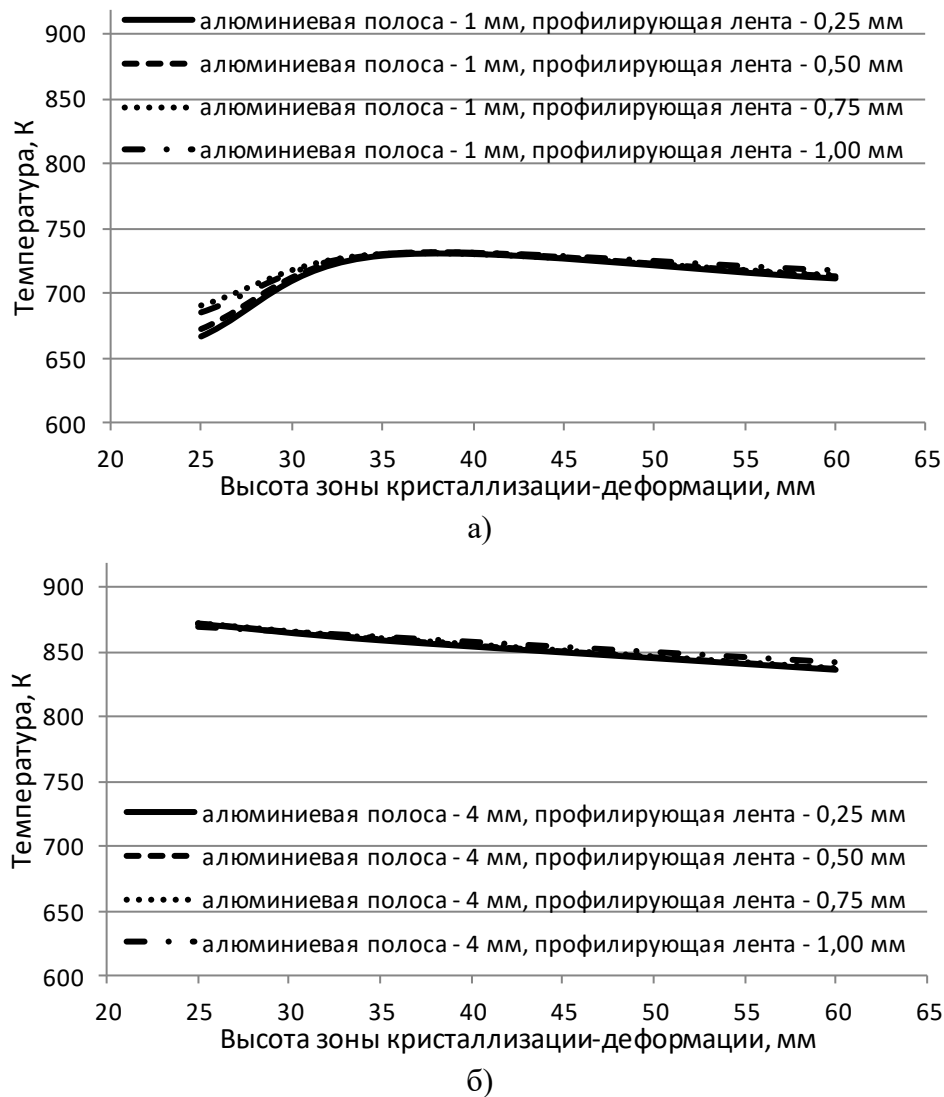


Рис. 3. Зависимость температуры тонкого участка профилированной полосы от высоты зоны кристаллизации-деформации и толщины стальной профилирующей ленты:

а) – для алюминиевой полосы толщиной 1 мм, б) – для алюминиевой полосы толщиной 4 мм

По мере увеличения высоты зоны кристаллизации-деформации температура полосы растет, что объясняется увеличением объема расплава, поступающего в зазор между валками-кристаллизаторами. Но, при достижении определенного значения высоты ванны расплава, для данного случая равного 35 мм, температура полосы начинает незначительно понижаться. Это объясняется увеличением протяженности зоны контакта металла с поверхностью валков-кристаллизаторов, что приводит к более интенсивному охлаждению полосы. При всем этом яркая выраженность данной закономерности уменьшается по мере увеличения толщины алюминиевой полосы.

Второй задачей, которой посвящена данная работа, является исследование влияния на степень деформации тонкого участка профилированной полосы, в ходе валковой разливки-прокатки, наличия дополнительного теплового сопротивления.

На рис. 4 представлены графики зависимостей степени деформации, тонкого участка профилированной полосы, от высоты зоны кристаллизации-деформации при разных толщинах применяемой стальной профилирующей ленты. Как мы видим, при увеличении толщины тонкого участка получаемой профилированной полосы протяженность зоны деформации в зоне кристаллизации-деформации уменьшается, а, следовательно, уменьшается и степень деформации этого участка. Так, при высоте зоны кристаллизации-деформации 25 мм и тол-

щине профилирующей ленты 0,25 мм, для толщины тонкого участка профилированной полосы 1 мм относительная степень деформации составляет 58 %. Это гарантирует полную проработку микроструктуры полосы, а именно, измельчение крупных зерен литой структуры, в ходе прокатки в валках-кристаллизаторах. Для тех же исходных параметров, но для толщины алюминия 4 мм, степень деформации равна 11 %.

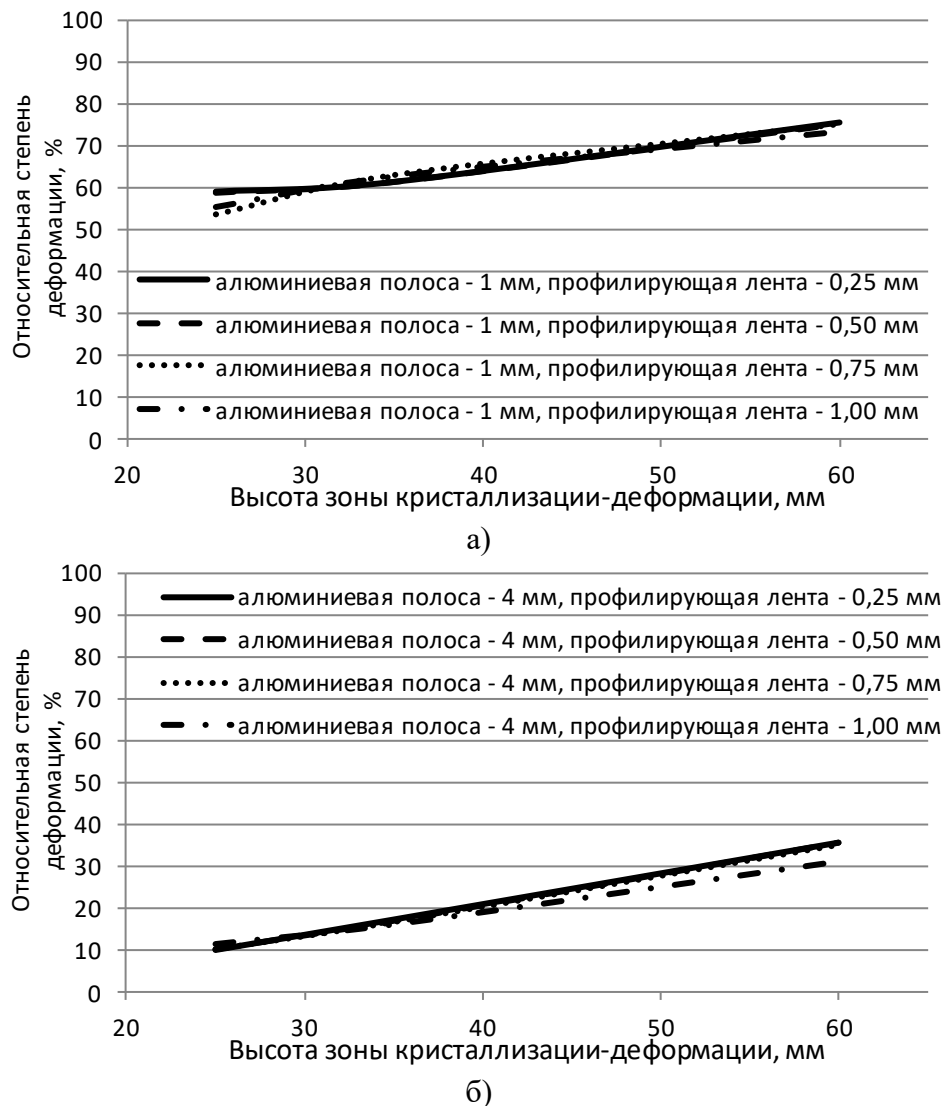


Рис. 4. Зависимость относительной степени деформации тонкого участка профилированной полосы от высоты зоны кристаллизации-деформации и толщины стальной профилирующей ленты:

а) – для толщины тонкого участка профилированной полосы 1 мм, б) – для толщины тонкого участка профилированной полосы 4 мм

По мере увеличения высоты зоны кристаллизации, степень деформации полосы увеличивается. Это объясняется, как и в случае с уменьшением температуры полосы на выходе из агрегата валковой разливки-прокатки, увеличением протяженности зоны контакта расплава с поверхностью валков-кристаллизаторов и более интенсивным теплообменом. Из данных графиков становится ясно, что на относительную степень деформации тонкого участка профилированной алюминиевой полосы, толщина применяемой профилирующей ленты не оказывает значительного влияния. Максимальное расхождение между относительными степенями деформации при различных толщинах профилирующей ленты составляет 4%, что не оказывает значительного влияния на проработку микроструктуры полосы в ходе прокатки.

ВЫВОДЫ

В данной работе проведено теоретическое исследование зависимости температуры и степени деформации тонких участков профилированных полос при валковой разливке-прокатке с дополнительным тепловым сопротивлением. Данным дополнительным тепловым сопротивлением является стальная профилирующая лента, используемая при предложенном способе профилирования поверхности бандажей валков-кристаллизаторов. Для достижения данной цели в работе применялась двумерная модель, построенная в конечно-элементной среде Ansys Flotran, в которой расплав рассматривается как вязкая жидкость.

Основными факторами, влияющими на качество получаемых полос, при бесслитковой прокатке, являются температура полосы на выходе из агрегата валковой разливки-прокатки и протяженность зоны деформации, а именно степень деформации полосы в ходе протекания процесса. Первым фактором, на который стоит обратить внимание, при разработке технологии является именно степень деформации полосы. Из литературных источников известно, что, для получения полос высокого качества, при валковой разливке-прокатке алюминия и его сплавов, степень деформации должна составлять не менее 20–30%, для сталей – 15% [9]. Это утверждение верно как для тонких, так и для толстых участков полос с профилированным поперечным сечением. Авторами в работе рассматривается участок зоны кристаллизации-деформации соответствующий тонкому участку профилированной полосы.

Теоретические исследования показали, что толщина стальной ленты, применяемой для профилирования поверхности валков-кристаллизаторов, влияет незначительно на степень деформации и почти не влияет на температуру тонкого участка профилированной полосы на выходе из агрегата валковой разливки-прокатки. Данные результаты позволяют исключить данный параметр как критический при разработке технологии и расширить сортимент получаемых полос с профилированным поперечным сечением.

Степень деформации тонких участков профилированных полос, при увеличении их толщины, уменьшается. Так, при толщине тонкого участка профилированной полосы 1 мм, толщине стальной профилирующей ленты 0,5 мм и высоте зоны кристаллизации-деформации 25 мм, относительная степень деформации будет равна 55 %. Данная величина степени деформации позволит полностью проработать литую структуру полосы в ходе прокатки на агрегате валковой разливки-прокатки. Ограничивающим фактором в данном случае будет служить техническая характеристика агрегата валковой разливки-прокатки, а именно сможет ли он выдержать силу прокатки, соответствующую данной степени деформации. Для толщины тонкого участка полосы равной 4 мм, при других идентичных параметрах, относительная степень деформации составит лишь 11 %, что меньше рекомендованных минимальных 15–20%. А вот при высоте зоны кристаллизации-деформации, равной 35 мм, степень деформации тонкого участка полосы такой толщины будет составлять 16%. Таким образом, при производстве профилированных полос валковой разливкой-прокаткой с тонкими участками толщиной 4 мм следует устанавливать высоту зоны кристаллизации-деформации, равную 35 мм и выше, так как при данных значениях литая структура данных участков полос будет полностью прорабатываться, что повысит прочностные характеристики полос в целом. Однако, при выборе высоты зоны кристаллизации-деформации, в ходе разработки технологии валковой разливки-прокатки полос с профилированным поперечным сечением, следует также учитывать ее влияние на температуру полосы на выходе из валков-кристаллизаторов. Данный параметр также влияет на микроструктуру полосы и, как следствие, ее качество. При росте толщины тонкого участка профилированной полосы с 1 мм до 4 мм, при высоте зоны кристаллизации-деформации 25 мм и толщине стальной профилирующей ленты 0,75 мм, ее температура вырастает с 690 К до 870 К. Однако, следует отметить, что в ходе исследований было установлено, что для небольших толщин тонкого участка профилированной полосы при росте высоты зоны кристаллизации-деформации температура этого участка полосы сначала увеличивается, а затем начинает снижаться. Так, для толщины тонкого участка полосы 1 мм, стальной профилирующей ленты 0,25 мм и высоты зоны кристаллизации-деформации 25 мм, температура на выходе из валков-кристаллизаторов составляет 685 К. При дальнейшем увеличении высоты зоны кристаллизации-деформации до 35 мм, температура также растет до 730 К. Но при последующем росте высоты зоны кристаллизации-деформации, температура тонкого участка профилированной полосы снижается до 717 К.

Полученные результаты будут использованы при разработке технологии бесслитковой прокатки полос с профилированным поперечным сечением в водоохлаждаемых валках-кристаллизаторах и позволят получать профилированные полосы с высокими механическими свойствами.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Merklein M. Manufacturing flexibilisation of metal forming components by tailored blanks / M. Merklein, M. Lechner // Proc. Conf. Competitive Manufacturing. – 2013 – P. 165–170.
2. Daamen M. Experimental and numerical investigation of double roller casting of strip with profiled cross section / M. Daamen, T. Förster, G. Hirt // Steel research int. – 2011 – Special Edition. – P. 93–98.
3. Hot rolling of AISI 304 tailored strips produced by twin roll strip casting / M. Vidoni, M. Daamen, J. Gastreich, N. Offermanns, G. Hirt // Production Engineering. – 2014. – №8(5). – P. 619–626.
4. Пат. UA 113368 C2 Україна, МПК В22D 11/06, В22D 11/10. Пристрій для валкової розливки-прокатки профільованих штаб / Гридин О.Ю., Огінський Й.К., Бондаренко С.В., Шапер М. – № а201600100; заявл.04.01.2016; опубл.10.01.2017 Бюл.1.
5. Столбченко М.Ю. Применение модуля Ansys Flotran для моделирования процесса валковой разливки-прокатки полос / М.Ю. Столбченко, А.Ю. Гридин // Обработка материалов давлением : сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 2011. – №3 (28). – С. 41–44.
6. Столбченко М.Ю. Влияние температуры и скорости разливки на параметры деформации при валковой разливке-прокатке полос из высокопрочных алюминиевых сплавов / М. Ю. Столбченко // Обработка материалов давлением : сборник научных трудов. – Краматорск : ДГМА, 2013. – №3 (36). – С. 173–179.
7. Определение коэффициента теплоотдачи в системе металл-валок при валковой разливке-прокатке алюминиевых сплавов / С. В. Бондаренко, А. Ю. Гридин, М. Ю. Столбченко, М. Шапер // Металл и литье Украины. – 2013. – №5 (240). – С. 3–8.
8. Stolbchenko M. Twin-roll casting and finishing treatment of thin strips of the hardening aluminum alloy EN AW-6082 / M. Stolbchenko, J. Grydin, M. Schaper // Materials Today: Proceedings 2S (2015). – S. 32–38.
9. Ноговицын А.В. Скорость литья алюминиевых и стальных полос на двухвалковых машинах / А. В. Ноговицын, И. Р. Баранов // Процессы литья. – 2013. – №2 (98). – С. 54–59.

REFERENCES

1. Merklein M. Manufacturing flexibilisation of metal forming components by tailored blanks / M. Merklein, M. Lechner // Proc. Conf. Competitive Manufacturing. – 2013 – P. 165–170.
2. Daamen M. Experimental and numerical investigation of double roller casting of strip with profiled cross section / M. Daamen, T. Förster, G. Hirt // Steel research int. – 2011 – Special Edition. – P. 93–98.
3. Hot rolling of AISI 304 tailored strips produced by twin roll strip casting / M. Vidoni, M. Daamen, J. Gastreich, N. Offermanns, G. Hirt // Production Engineering. – 2014. – №8(5). – P. 619–626.
4. Pat.UA 113368 C2 Ukraine, MPK V22D 11/06, V22D 11/10. Pristrij dlja valkovoi rozlivki-prokatki profil'ovanih shtab / Gridin O.Ju., Ogins'kij J.K, Bondarenko S.V., Shaper M. – № а201600100; zajavl.04.01.2016; opubl.10.01.2017 Bjul.1.
5. Stolbchenko M.Ju. Primenenie modulja Ansys Flotran dlja modelirovanija processa valkovoj razlivki-prokatki polos / M.Ju. Stolbchenko, A.Ju. Gridin // Obrabotka materialov davleniem : sbornik nauchnyh trudov. – Kratomorsk : DGMA, 2011. – №3 (28). – S. 41–44.
6. Stolbchenko M.Ju. Vlijanie temperatury i skorosti razlivki na parametry deformacii pri valkovoj razlivke-prokatke polos iz vysokoprochnyh aljuminievyh splavov / M. Ju. Stolbchenko // Obrabotka materialov davleniem : sbornik nauchnyh trudov. – Kratomorsk : DGMA, 2013. – №3 (36). – S. 173–179.
7. Opredelenie koeficienta teplootdachi v sisteme metall-valok pri valkovoj razlivke-prokatke aljuminievyh splavov / S. V. Bondarenko, A. Ju. Gridin, M. Ju. Stolbchenko, M. Shaper // Metall i lit'e Ukrainy. – 2013. – №5 (240). – S. 3–8.
8. Stolbchenko M. Twin-roll casting and finishing treatment of thin strips of the hardening aluminum alloy EN AW-6082 / M. Stolbchenko, J. Grydin, M. Schaper // Materials Today: Proceedings 2S (2015). – S. 32–38.
9. Nogovicyn A.V. Skorost' lit'ja aljuminievyh i stal'nyh polos na dvuhvalkovykh mashinah / A. V. Nogovicyn, I. R. Baranov // Processy lit'ja. – 2013. – №2 (98). – S. 54–59.

Бондаренко С. В. – аспирант каф. ОМД им. акад. А. П. Чекмарева, НМетаУ
Гридин А. Ю. – д-р техн. наук, гл. инж. Университета г. Падерборн (ФРГ)
Шапер М. – д-р техн. наук, проф. Университета г. Падерборн (ФРГ)

НМетаУ – Национальная металлургическая академия Украины, г. Днепр.

E-mail: sergey_bondarenko_89@bk.ru

Статья поступила в редакцию 17.02.2017 г.