

А. Ю. Гридин, В. А. Хвист, М. Шапер*

Национальная металлургическая академия Украины, Днепропетровск

*Ганноверский университет им. Лейбница, Германия

Прокатка биметаллических алюминиево-стальных полос, полученных валковой разливкой-прокаткой

Описаны эксперименты по холодной прокатке биметаллических алюминиево-стальных полос, произведенных по инновационной технологии валковой разливки-прокатки. Представленные результаты позволяют сделать вывод о деформируемости данной двухслойной композиции при различных схемах прокатки, а также о критических степенях деформации, приводящих к ее разрушению.

Ключевые слова: прокатка, биметаллические полосы, разливка-прокатка, деформируемость, разрушение, валковая разливка-прокатка

Биметаллические листовые материалы на основе алюминия и стали находят все более широкое применение в различных областях техники. Комбинация легкого, высокотеплопроводного и коррозионностойкого алюминия с прочной и жесткой сталью позволяет добиться сочетания свойств, недостижимых при использовании каждого из них в отдельности. Благодаря этому качеству, биметаллические алюминиево-стальные листы нашли свое применение, в частности, в судостроении – в качестве соединительных переходников между стальным корпусом судна и его алюминиевыми надстройками; в химической промышленности – при изготовлении резервуаров для хранения и транспортировки агрессивных жидкостей [1]; в современной кухонной посуде – многослойное дно позволяет равномернее распределять тепло; в автомобильной промышленности, авиационно-ракетной технике и прочих сферах жизнедеятельности человека. Следует отметить, что вследствие расширяющихся областей использования спрос на плоскую алюминиево-стальную заготовку непрерывно растет.

В настоящее время основными промышленными способами производства данного биметаллического композита являются сварка давлением, осуществляемая для листовых изделий методом прокатки, и сварка взрывом.

Из двух указанных способов технология соединения алюминия со сталью прокаткой является более производительной, безопасной и менее трудоемкой. Соединение компонентов биметалла происходит при их совместной горячей или холодной пластической деформации, осуществляемой на прокатных станах в условиях вакуума или на воздухе [2]. Недостатком метода является большое количество операций по предварительной подготовке полос, таких как травление и механическая очистка поверхности, сборка листов в пакеты и т. д. **В большинстве случаев операции сварки давлением осуществляются дискретно, что, в свою очередь, отрицательно сказывается на производительности и, в конечном итоге, приводит к повышению себестоимости продукции.**

При сварке взрывом процесс соединения мате-

риалов происходит за счет их высокоскоростного соударения, в ходе которого плакирующий слой металла на основу направленной энергией заряда взрывчатого вещества [3]. Обеспечивая высокое качество соединения, этот метод, тем не менее, обладает следующими недостатками: необходимость в организации полигонов для проведения взрывных работ, обеспечение их подъездными путями и оборудованием; использование и хранение взрывчатки связано с повышенной опасностью производства; невозможность получения длинномерной биметаллической продукции из-за дискретности и пространственной ограниченности операций сварки взрывом.

Альтернативой указанным методам может явиться технология получения биметаллических алюминиево-стальных полос валковой разливкой-прокаткой. Суть нового способа заключается в непрерывной подаче со стороны одного из валков твердой стальной полосы в зону кристаллизации-деформации алюминия, который подается в межвалковый зазор в исходном жидком состоянии. Под влиянием затвердевания алюминия, кратковременного действия в области контакта материалов высоких температур и сжимающих напряжений за счет пластического формоизменения закристаллизовавшегося металла в валках-кристаллизаторах между компонентами композита происходит процесс сварки. Совместное действие перечисленных факторов определяет диффузионный характер возникающего соединения. Оптимальные условия реализации процесса производства биметаллических полос должны приводить к образованию на контакте алюминия со сталью сплошного диффузионного слоя толщиной до 10 мкм [4] (по другим данным до 5 мкм [5]). Удовлетворение указанного требования по максимальной толщине интердиффузионной области снижает негативное влияние твердых, но хрупких интерметаллических Fe_xAl_y -фаз, и сказывается положительным образом на вязкости и пластических свойствах получаемого слоистого материала. Преимуществами приведенной схемы ведения процесса являются его непрерывность, отсутствие необходимости предварительной подготовки поверхности алюминиевой полосы-заготовки, а

также экологичность, энерго- и ресурсосбережение, характерные для технологии валковой разливки-прокатки [6].

Описанный способ производства биметаллических полос из сплавов разнородных металлов путем валковой разливки-прокатки на примере соединения алюминия и стали был впервые реализован на практике в ходе совместной научной работы специалистов кафедры ОМД НМетАУ и Института материаловедения ганноверского университета им. Лейбница (ФРГ). Исследования осуществлялись на совместно сконструированной, изготовленной и введенной в эксплуатацию машине валковой разливки-прокатки [7]. В результате проведения экспериментов были получены биметаллические алюминий-стальные полосы, однако всестороннего анализа качества и свойств полученного плоского полупродукта до сих пор не проводилось.

Целью данной работы является исследование деформируемости биметаллических алюминий-стальных полос, полученных валковой разливкой-прокаткой, а также установление критических степеней холодной пластической деформации, приводящих к расслоению двухслойного композита. Выбор способа формоизменения полос был сделан в пользу простого процесса прокатки, поскольку именно эта технологическая операция часто используется в комбинации с валковой разливкой-прокаткой для улучшения качества поверхности и микроструктуры литых листов из моно материалов [8, 9].

В качестве исходного материала для производства биметаллической алюминий-стальной полосы использовался технически чистый (99,7 %) алюминий, химический состав которого соответствует спецификации ENAW-1070, а также полоса размерами 0,5×160 мм из нержавеющей аустенитной стали 1.4301, химический состав которой соответствует отечественному сплаву 08X18H10. Предварительной подготовки поверхности стальной полосы перед экспериментом не проводилось. Основные параметры процесса валковой разливки-прокатки, использованные при получении двухслойного композита, приведены в табл. 1. Следует отметить, что для подачи расплава в межвалковый зазор использовалось составное керамическое сопло с двумя цилиндрическими каналами Ø 7 мм с конструкцией, аналогичной описанной в работе [9].

В результате валковой разливки-прокатки была получена алюминий-стальная полоса с соотношением между толщиной слоев, примерно равным 3,7, и с изначально отсутствующими рассло-

ениями между компонентами композита по всей его длине. Поверхность изготовленного полупродукта не содержала видимых дефектов в виде трещин, однако имела на некоторых участках со стороны алюминия характерную для литого состояния матовость и бугристость.

Из произведенной биметаллической полосы было отобрано 24 узких образца, которые были подвергнуты холодной прокатке на лабораторном стане дуо-140 с различными степенями деформации по двум различным схемам.

Первая серия из 8 образцов была продеформирована по режимам, сведенным в табл. 2. Знак «+» в строке «Расслоение» табл. 2 обозначает произошедшую деламинацию стального слоя и соответствует условиям разрушения биметалла.

Анализ полученных экспериментальных данных показывает, что при поштучной холодной прокатке биметаллических алюминий-стальных полос, полученных валковой разливкой-прокаткой, расслоение композита происходит при условных степенях деформации более 11,4 %. При малом превышении указанной критической степени деформации деламинация происходит локально (рис. 1, а). Увеличение величины обжатия за проход приводит к росту протяженности зон разрушения в диффузионной области. При степени деформации равной 19,1 % наблюдалась полная деламинация стального слоя.

Таблица 1

Основные технологические параметры валковой разливки-прокатки биметаллической алюминий-стальной полосы

| Технологический параметр | Значение |
|---|--|
| Температура разливки алюминия, °С | 690,00 |
| Температура стальной полосы, °С | 190,00 |
| Скорость разливки, м/мин | 5,10 |
| Высота зоны кристаллизации-деформации, мм | 40,00 |
| Средняя толщина готовой полосы, мм | 2,35 |
| Смазка поверхности валков | нитрид бора |
| Расход охлаждающей жидкости, л/мин | 112,00 |
| Температура охлаждающей жидкости, °С | 18,00 |
| Положение литейного сопла | симметрично относительно оси разливки-прокатки |

Таблица 2

Режимы поштучной прокатки биметаллических алюминий-стальных образцов

| Режимы | Номер образца | | | | | | | |
|----------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| h_0 , мм | 2,28 | 2,35 | 2,30 | 2,35 | 2,40 | 2,20 | 2,47 | 2,54 |
| b_0 , мм | 21,60 | 24,33 | 23,95 | 19,90 | 20,95 | 23,00 | 19,53 | 22,45 |
| l_0 , мм | 205,50 | 206,00 | 203,00 | 207,00 | 206,50 | 204,00 | 206,00 | 205,00 |
| h_1 , мм | 2,03 | 2,04 | 2,09 | 1,90 | 2,04 | 2,06 | 2,04 | 2,25 |
| b_1 , мм | 21,70 | 25,55 | 24,05 | 20,50 | 22,10 | 23,15 | 20,70 | 23,15 |
| l_1 , мм | 228,00 | 210,00 | 218,00 | 248,00 | 245,00 | 218,00 | 243,00 | 218,00 |
| Λ | 1,11 | 1,01 | 1,07 | 1,20 | 1,18 | 1,07 | 1,18 | 1,06 |
| ϵ , % | 10,90 | 13,20 | 9,10 | 19,10 | 15,00 | 6,40 | 17,40 | 11,40 |
| Расслоение | - | + | - | + | + | - | + | - |

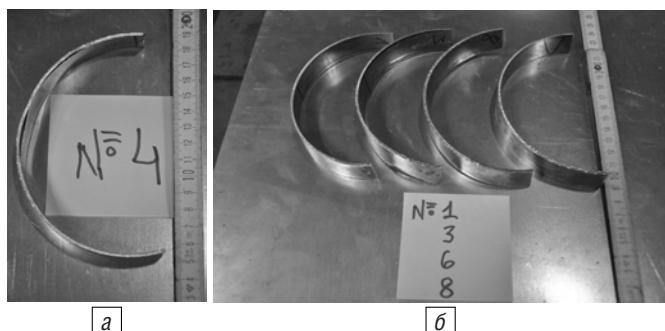


Рис. 1. Биметаллические полосы, подвергнутые поштучной холодной прокатке со степенью деформации более 12 % (а) и до 12 % (б)

Фотографии образцов после поштучной прокатки, приведенные на рис. 1, дают представление о характере пластического формоизменения биметаллической полосы. В ходе каждого из экспериментов наблюдался изгиб образцов по радиусу таким образом, что алюминиевый слой оказывался на внешней, а стальной – на внутренней стороне образуемых полуколец. Такая закономерность связана с несимметричностью течения металла в зоне деформации алюминиево-стального композита за счет более низких значений напряжений текучести алюминия по сравнению со сталью при прочих равных условиях. Таким образом, обжатие по толщине локализуется в алюминиевом слое, а его результирующее удлинение в совокупности с незначительным изменением продольного размера стального слоя приводит к наблюдаемому изгибу биметаллической полосы. Как следствие, на контакте двух разнородных материалов возникают растягивающие напряжения, приводящие даже при относительно невысоких степенях деформации к разрушению интерметаллического соединения. Очевидно, что схема деформированного состояния при поштучной прокатке биметаллических алюминиево-стальных полос не является оптимальной, а данная технологическая операция непригодна для обработки плоского полупродукта давлением с целью улучшения качества его поверхности, микроструктуры и свойств.

Существенно снизить неравномерность пластического формоизменения двухслойного композита при прокатке можно за счет обеспечения симметричности течения материала относительно оси зоны деформации. Одним из возможных способов ее достижения служит прокатка биметаллических полос в пакетах. Следует отметить, что технология пакетной прокатки является известным высокопроизводительным и экономичным способом обработки металлических композиционных материалов и применяется при производстве листов, полос, лент, фасонных профилей, прутков и проволоки как из разнородных металлов, так и из сплавов, близких по химическому составу, но отличающихся своими физическими и механическими свойствами.

Для исследования деформируемости биметаллических алюминиево-стальных полос, полученных валковой разливкой-прокаткой, в условиях пакетной прокатки была проведена следующая серия экспериментов. Оставшиеся 16 биметаллических образцов были собраны в 8 симметричных двойных пакетов, обращенных алюминиевыми слоями наружу. Фиксация полос-заготовок в пакетах осуществлялась с их переднего и заднего концов при помощи алюминиевых заклепок. Пример подготовленных к прокатке пакетов алюминиево-стальных полос показан на рис. 2.

Подготовленные описанным выше способом образцы были подвергнуты холодной продольной прокатке по различным режимам, осуществляющейся в аналогичных условиях и на том же оборудовании, что и серия экспериментов по поштучной прокатке. Деформация собранных в пакеты биметаллических алюминиево-стальных полос осуществлялась в два прохода и так, чтобы можно было обеспечить варьирование обжатий от пакета к пакету по отдельным проходам при примерно равной величине суммарной степени деформации.

Основные геометрические параметры, описывающие формоизменение образцов в первом проходе, представлены в табл. 3. Здесь и далее толщина каждого пакета принималась равной средней величине результатов трех измерений в центральной части пакета. Фотография образцов после холодной пакетной прокатки приведена на рис. 3.

Анализ данных табл. 3 и рис. 3 позволяет сделать



Рис. 2. Подготовленные к прокатке пакеты биметаллических алюминиево-стальных полос

Таблица 3

Режимы пакетной прокатки биметаллических алюминиево-стальных образцов в первом проходе

| Режимы | Номер образца | | | | | | | |
|-------------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| h_0 , мм | 5,99 | 5,78 | 5,70 | 6,48 | 5,82 | 5,75 | 5,80 | 5,88 |
| b_0 , мм | 22,70 | 19,90 | 22,00 | 22,80 | 21,40 | 21,50 | 23,80 | 26,50 |
| l_0 , мм | 147,00 | 146,00 | 132,00 | 147,00 | 142,00 | 125,00 | 128,00 | 130,00 |
| h_1 , мм | 3,00 | 3,36 | 3,80 | 2,67 | 3,88 | 2,15 | 3,65 | 2,80 |
| b_1 , мм | 24,70 | 22,50 | 22,71 | 25,80 | 22,35 | 24,50 | 25,30 | 28,40 |
| l_1 , мм | 216,00 | 190,00 | 146,00 | 242,00 | 164,00 | 208,00 | 159,00 | 200,00 |
| Λ | 1,47 | 1,30 | 1,10 | 1,65 | 1,15 | 1,66 | 1,24 | 1,54 |
| ε , % | 49,90 | 41,90 | 33,30 | 59,10 | 33,30 | 63,60 | 37,10 | 52,40 |
| Расслоение | – | – | – | – | – | ± | – | – |

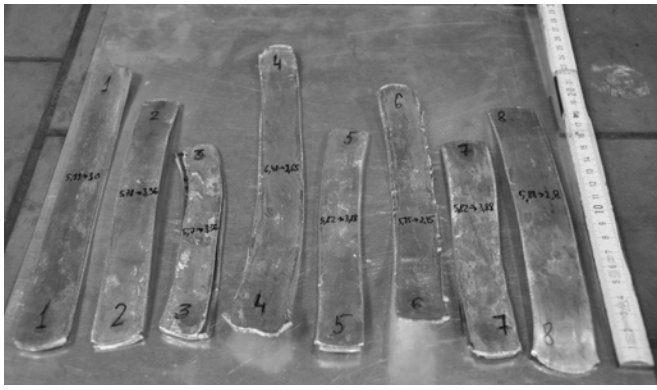


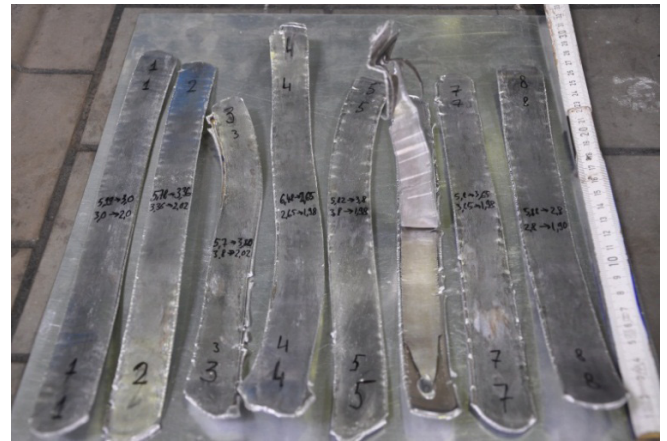
Рис. 3. Биметаллические алюминиево-стальные полосы после первого прохода пакетной прокатки

вывод о том, что обеспечение условий симметричности пластического течения в зоне деформации позволило существенно уменьшить неравномерность формоизменения, избежать изгиба биметаллических полос и возникновения растягивающих напряжений в области диффузионного соединения. За счет этого удалось добиться существенного увеличения степени деформации двухслойного композита, не приводящей к его расслоению. После первого прохода только на одном образце пакета, продеформированного с максимальной в серии степенью деформации величиной около 64 %, были отмечены следы локальных расслоений. Также заметно улучшилось качество поверхности алюминиевого слоя.

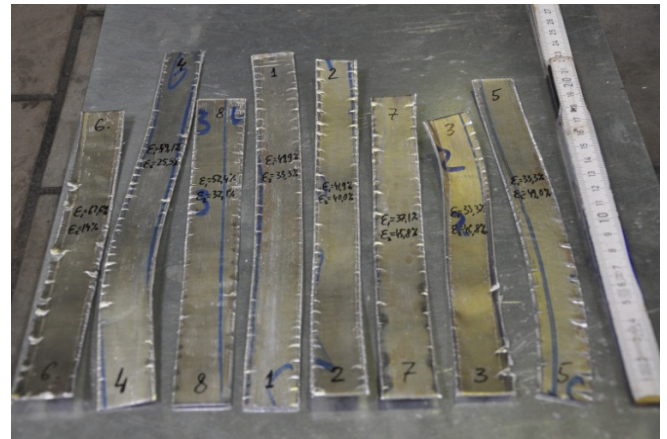
После первого прохода и анализа экспериментальных данных собранные в пакеты полосы были прокатаны вторично с различными обжатиями на конечную толщину ~2 мм. Данные о размерах образцов и режимах их деформации представлены в табл. 4.

После второго прохода холодной пакетной прокатки передние и задние концы пакетов, соединенные заклепками, были обрезаны на гильотинных ножницах. В дальнейшем пакеты были разделены на отдельные биметаллические алюминиево-стальные полосы, фотографии которых со стороны алюминиевого и стального слоев показаны на рис. 4. Конечная толщина образцов двухслойного композита составила $1 \pm 0,2$ мм.

Результаты второго прохода пакетной холодной



а



б

Рис. 4. Разделенные образцы после второго прохода пакетной прокатки: вид со стороны алюминиевого (а) и стального слоев (б)

прокатки в целом отвечают тенденциям, отмеченным после первого прохода. Один из образцов пакета, подвергнутый на первой деформационной стадии максимальной в серии степени пластической деформации, расслоился по всей поверхности контакта алюминия со сталью. Поскольку суммарные обжатия в эксперименте оказались примерно равными, очевидно, что критической степенью деформации следует считать максимальную относительную деформацию за проход, а ее величина для биметаллических алюминий-стальных полос, полученных

Режимы пакетной прокатки биметаллических алюминиево-стальных образцов во втором проходе

| Режимы | Номер образца | | | | | | | |
|-------------------------|---------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| h_0 , мм | 3,00 | 3,36 | 3,80 | 2,67 | 3,88 | 2,15 | 3,65 | 2,80 |
| b_0 , мм | 24,70 | 22,50 | 22,71 | 25,80 | 22,35 | 24,50 | 25,30 | 28,40 |
| l_0 , мм | 216,00 | 190,00 | 146,00 | 242,00 | 164,00 | 208,00 | 159,00 | 200,00 |
| h_1 , мм | 2,00 | 2,02 | 2,02 | 1,98 | 1,98 | 1,85 | 1,98 | 1,90 |
| b_1 , мм | 25,70 | 23,60 | 24,30 | 25,80 | 25,00 | 24,70 | 26,70 | 28,70 |
| l_1 , мм | 299,00 | 285,00 | 215,00 | 304,00 | 266,00 | 242,00 | 260,00 | 268,00 |
| Λ | 1,38 | 1,50 | 1,47 | 1,26 | 1,62 | 1,16 | 1,63 | 1,34 |
| ϵ , % | 33,30 | 40,00 | 46,80 | 25,30 | 49,00 | 14,00 | 45,80 | 32,10 |
| ϵ_{Σ} , % | 66,60 | 65,00 | 64,60 | 69,40 | 66,00 | 67,80 | 65,90 | 67,70 |
| Расслоение | – | – | – | – | – | ± | – | – |

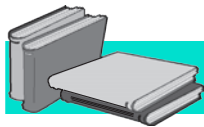
Таблица 4 валковой разливкой-прокаткой составляет около 64 %.

Измерения толщины деламинарованного стального слоя после двух проходов пакетной прокатки показали ее уменьшение с 0,5 до 0,29 мм. Соответствующая данному утончению стального слоя величина степени деформации составляет 42 %. Появившиеся на некоторых образцах трещины на кромоочных участках стального слоя демонстрируют достижение аустенитной стали 1.4301, предельно возможной в условиях холодного нагружения по выбранной схеме пакетной прокатки относительной степени деформации. Дальнейшее

повышение ресурса пластичности материала представляется возможным за счет подогрева пакетов до нижней границы интервала теплой прокатки нержавеющих сталей либо изменением направления прокатки между проходами на 90°.

В целом в ходе проведения экспериментов биметаллические алюминий-стальные полосы, полу-

ченные валковой разливкой-прокаткой, продемонстрировали высокую способность к деформируемости в условиях холодной пакетной прокатки, что позволяет сделать вывод о хорошем качестве композиционного продукта, производимого предлагаемым инновационным способом.



ЛИТЕРАТУРА

1. Засуха П. Ф., Корщиков В. Д., Бувалов Б. О. Биметаллический прокат. – М.: Metallurgy, 1970. – 263 с.
2. Голованенко С. А. Сварка прокаткой биметаллов. Под ред. Э. С. Каракозова. – М.: Metallurgy, 1977. – 160 с.
3. Шоршоров М. Х., Колесниченко В. А., Алехин В. П. Клинопрессовая сварка давлением разнородных металлов. – М.: Metallurgy, 1982. – 112 с.
4. Сварка разнородных металлов и сплавов / В. Р. Рябов, Д. М. Рабкин, Р. С. Курочка и др. – М.: Машиностроение, 1984. – 239 с.
5. Stahl-Alu-Hybridplatte ist serienreif // Blech, Rohre, Profile, 2011. – № 1-2. – P. 28.
6. Zaruskaiov N. Comparison of continuous strip casting with conventional technology // ISIJ International, 2003. – № 8. – P. 1115-1127.
7. Экспериментальная установка валковой разливки-прокатки тонких полос / А. Ю. Гридин, И. К. Огинский, В. Н. Данченко и др. // Metallургическая и горнорудная пром-сть. – 2010. – № 5. – С. 46-51.
8. Hagemann F. Auswirkung einer direkten Nachbehandlung auf die Produkteigenschaften beim Dünnbandgiessen / Diss. zum Dr.-Ing. in Umformtechnische Schriften. Band 112, 2003. – 120 s.
9. Гридин А. Ю., Шапер М., Данченко В. Н. Получение полос из высокопрочных алюминиевых сплавов валковой разливкой-прокаткой // Обработка металлов давлением, 2011. – № 3 (28). – С. 184-194.

Анотація

Гридин А. Ю., Хвіст В. А., Шапер М.

Прокатка біметалевих алюмінієво-сталевих смуг, отриманих валковим розливанням-прокаткой

Описано експерименти по холодній прокатці біметалевих алюмінієво-сталевих смуг, вироблених за інноваційною технологією валкового розливання-прокатки. Представлено результати, які дозволяють зробити висновок про здеформовуваність даної двошарової композиції за різними схемами прокатки, а також про критичні ступені деформації, що призводять до її руйнування.

Ключові слова

прокатка, біметалеві смуги, розливання-прокатка, здеформовуваність, руйнування, валкове розливання-прокатка

Summary

Grydin O.Yu., Khvist V. A., Shaper M.

Rolling of the bimetallic aluminum-steel strips received by roller casting rolling

Experiments on a cold rolling of clad aluminum-steel strips produced by means of an innovative technology of roller casting rolling are described. The presented results can lead to evaluation of the deformability of the flat bimetallic composition at various rolling variant. The values of a critical strain leading to the clad aluminum-steel strips fracture are established.

Keywords

rolling, bimetallic stripes, casting rolling, deformability, destruction, roller casting rolling

Поступила 30.10.12