

УДК 621.771.23 : 621.771.8

## СЛОИСТЫЙ КОМПОЗИТ СТАЛЬ-АЛЮМИНИЙ С НАНОСТРУКТУРНЫМ ПРОМЕЖУТОЧНЫМ СЛОЕМ

© 2011 г. Ю. В. Концевой, Е. В. Игнатъева, И. Э. Игнатъев, Э. А. Пастухов,  
И. Г. Бродова, С. А. Петрова, И. Г. Ширинкина, Р. Г. Захаров

Институт металлургии (ИМЕТ) УрО РАН, г. Екатеринбург  
Институт физики металлов (ИФМ) УрО РАН, г. Екатеринбург

**Ю. В. Концевой** – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. лаборатории физической химии металлургических расплавов ИМЕТ УрО РАН (г. Екатеринбург, ул. Амундсена, 101). Тел.: (343) 232-90-44. E-mail: kuv.45@mail.ru.  
**Е. В. Игнатъева** – науч. сотр. той же лаборатории. Тел.: (343) 232-90-35. E-mail: l.ig\_a@mail.ru.  
**И. Э. Игнатъев** – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. той же лаборатории. Тел.: (343) 232-90-14. E-mail: igx2@mail.ru.  
**Э. А. Пастухов** – чл.-корр. РАН, докт. хим. наук, проф., заведующий той же лабораторией. E-mail: admin@imet.mplik.ru.  
**С. А. Петрова** – канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. той же лаборатории. Тел.: (343) 267-88-94. E-mail: danaus@mail.ru.  
**Р. Г. Захаров** – канд. физ.-мат. наук, ст. науч. сотр. той же лаборатории. E-mail: danaus@mail.ru.  
**И. Г. Бродова** – докт. техн. наук, проф., гл. науч. сотр. лаборатории цветных сплавов ИФМ УрО РАН (620041, г. Екатеринбург, ул. С. Ковалевской, 18). Тел.: (343) 378-36-11. E-mail: brodova@imp.uran.ru.  
**И. Г. Ширинкина** – канд. техн. наук, науч. сотр. той же лаборатории. Тел.: (343) 378-38-54. E-mail: shirinkina@imp.uran.ru.

Представлены результаты исследования влияния степени деформации при прокатке на структуру компонентов слоистого композита сталь-алюминий. Показано, что заметные изменения структуры начинаются со степени обжатия  $\epsilon > 75\%$ , или в логарифмических единицах  $e > 1.54$ . Описан механизм пластической деформации хрупкого интерметаллидного слоя. Показано, что вязкопластичный промежуточный слой сталь-алюминиевого слоистого композита можно получить прокаткой при доведении степени деформации до 90%. Получение же субмикроструктуры стальной структуры происходит при  $\epsilon > 95\%$ , или  $e > 3$ .

**Ключевые слова:** слоистый композит, интерметаллид, интенсивная пластическая деформация, прокатка, степень деформации, наноструктура, фрагментация структуры.

The given article presents the research results of the changes that the lamellar steel-aluminum compound structure undergoes depending on the degree of deformation during rolling. Noticeable changes in the structure are shown to begin at a percent reduction of  $\epsilon > 75\%$  or  $e > 1.54$  in logarithmic units. The mechanism of plastic deformation of the fragile intermetallic layer is described. It is shown that the viscoplastic intermediate steel-aluminum lamellar composite layer can be produced by rolling if the degree of deformation is raised to  $\epsilon = 90\%$ . Submicrocrystalline structure can be however obtained at  $\epsilon > 95\%$  ( $e > 3$ ).

**Key words:** laminated composite, intermetallic compound, intense plastic deformation, rolling, degree of deformation, nanostructure, structural fragmentation.

Слоистые композиты (СК) представляют собой материалы, составленные из чередующихся слоев различных по природе или составу листовых материалов, обладают рядом качеств (коррозионная стойкость, трибологические свойства, повышенная электропроводность и т. д.), которые им делегируют входящие компоненты, что делает их незаменимыми при создании специальных изделий [1]. Однако при производстве некоторых СК, например сталь-алюминий, сталь-титан, в зоне контакта разнородных материалов образуются промежуточные весьма хрупкие слои интерметаллических соединений, которые резко ограничивают область применения этих композитов [2]. До настоящего времени для снижения вредного влияния такого слоя стараются минимизировать его толщину различными химическими и технологическими операциями [3, 4]. Последние исследования [5–7] показали, что коренным образом устранить эту проблему можно за

счет фазовых превращений в промежуточном слое при фрагментации его структуры до наноразмерной.

Цель настоящей работы – оценка возможности получения слоистого композита системы сталь-алюминий с пластичным наноструктурным промежуточным слоем.

Наиболее распространенным методом измельчения структуры является интенсивная пластическая деформация (ИПД), которая чаще всего реализуется двумя способами: кручением под давлением, осуществляемым в наковальнях Бриджмена, и равноканальным угловым прессованием [8]. При всей привлекательности данных способов использовать их для решения задач фрагментации структуры в компонентах СК не представляется возможным. Поэтому было принято решение для реализации ИПД использовать прокатку [9].

Исходным материалом для исследований был слоистый композит (обр. 0), полученный по тех-

нологическому режиму, описанному в работе [10]. Он состоит из трех слоев – стальной основы толщиной  $h_0 \approx 2340$  мкм, промежуточного интерметаллидного слоя с  $h_{Fe} \approx 40$  мкм и алюминиевого –  $h_{Al} \approx 570$  мкм. Структура полученного СК представляет собой слегка вытянутые вдоль направления прокатки зерна феррита (коэффициент вытянутости зерна 1,1–1,2) размером 10–15 мкм, сплошной, однородный по толщине слой интерметаллида состава  $Fe_2Al_5$  и алюминиевое покрытие с пористостью ~ 7 %. Фотографии микроструктуры такого композита (поперечный и продольный шлифы) представлены на рис. 1.

С целью получения субмикро- и нанокристаллической структуры промежуточного интерметаллического слоя изучаемый СК подвергали прокатке при комнатной температуре. Суммарную степень деформации определяли в логарифмическом виде:

$$e = \ln(h_0/h_k),$$

где  $h_0$  – толщина исходного образца,  $h_k$  – после последнего пропуска, а также в процентном отношении:

$$\epsilon = \frac{h_0 - h_k}{h_0} \cdot 100 \text{ \%}.$$

Для оценки влияния деформации на структуру композита из прокатанных образцов вырезали по две пробы и делали шлифы со структурой вдоль и поперек прокатки. Структуру обр. 1, 2, 4 и 5 исследовали на оптическом микроскопе «Olympus GX-51»

при увеличениях  $200\times$  и  $500\times$ , а обр. 3 и 6 – на сканирующем электронном микроскопе «Quanta-200» Рентгенофазовый анализ исходного и прокатанного обр. 3 проводили на дифрактометре Дрон-УМ1 ( $CuK\beta$ -излучение, монохроматор из пиролитического графита на отраженном пучке, в качестве внешнего стандарта использовался кремний).

Значения степени деформации образцов, отобранных для исследования структуры, приведены в табл. 1.

Таблица 1. Степень деформации отобранных образцов для исследования их структуры

№ образца	e	$\epsilon$ , %
1	1,54	78
2	1,54	78
3	2,28	90
4	2,84	94
5	3,48	97
6	3,71	98

При  $\epsilon = 78 \text{ \%}$  (рис. 2) происходит образование волокнистой структуры стали (коэффициент вытянутости зерен 8–10). Интерметаллидный слой, имеющий низкую пластичность и высокую по сравнению со сталью и алюминием твердость, под действием

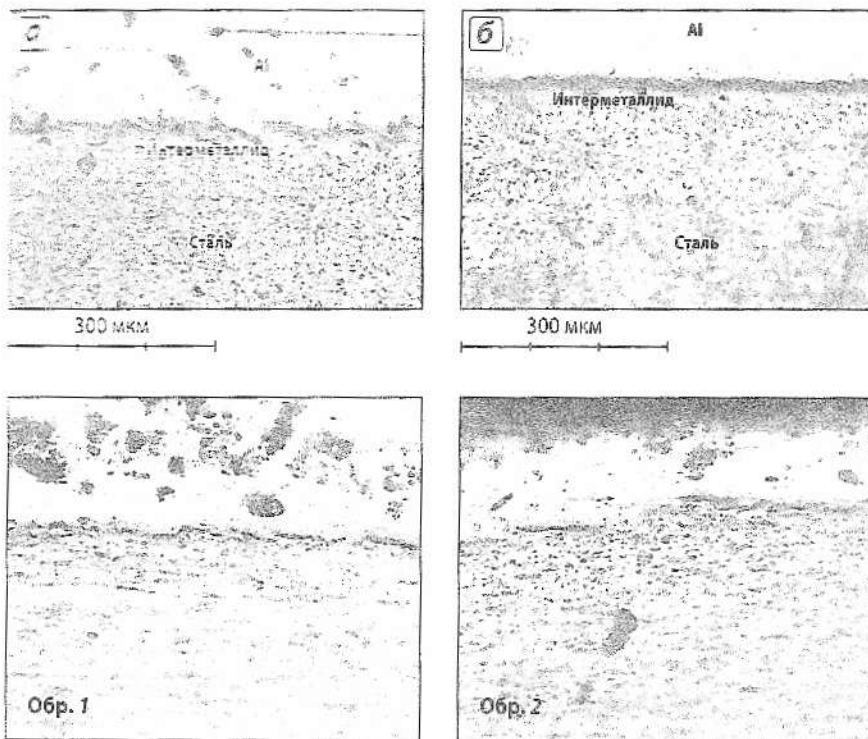


Рис. 1. Структура композита «сталь–интерметаллид–алюминий» поперек (а) и вдоль (б) прокатки

Рис. 2. Структура образцов 1 (поперек прокатки) и 2 (вдоль нее)

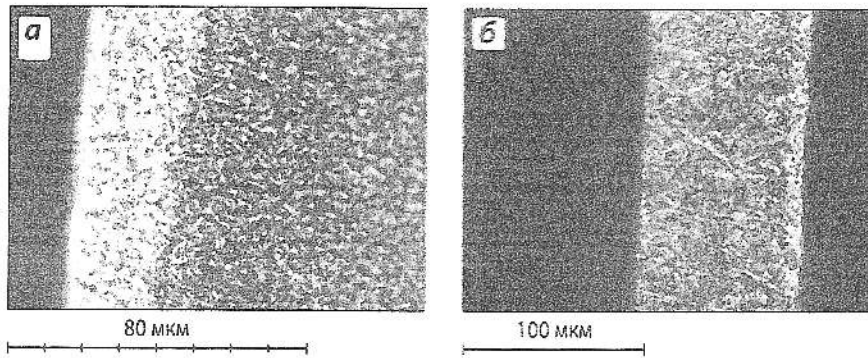


Рис. 3. Структура нетравленных шлифов (x500)  
а – обр. 3, б – обр. 4  
(оба – вдоль прокатки)

растягивающих усилий местами разрывается. При этом поверхности стали и алюминия, скользя по интерметаллиду, очищаются до ювенильного состояния и в очаге деформации без доступа воздуха под действием давления прокатки мгновенно свариваются. Таким образом обеспечивается сплошность и прочность сцепления слоев. Фрагменты интерметаллидного слоя размером до 150–200 мкм превращаются в упрочняющие элементы, расположенные вдоль контактного слоя. «Капсулированные» в сталь-алюминиевой матрице и имеющие значительно меньшую длину по сравнению с очагом деформации при прокатке (4–6 мм), эти фрагменты при дальнейшей прокатке находятся в благоприятном напряженном состоянии (всестороннего сжатия с повышенными значениями главных напряжений  $\sigma_2$  и  $\sigma_3$ ) для проявления пластических свойств. В результате интерметаллид деформируется с величиной  $\epsilon$ , близкой к средней деформации СК, т. е. после  $\epsilon \sim 50\%$  толщины промежуточного слоя и композита при обжатии уменьшаются пропорционально. Это видно из рис. 3 (обр. 3 и 4), иллюстрирующего развитие процессов деформации и

изменения структуры. Фотографии шлифов показывают, что расстояния между фрагментами интерметаллида увеличиваются незначительно, что свидетельствует о равенстве величин вытяжки основы, покрытия и интерметаллического слоя.

На рис. 4 представлены дифрактограммы исходного и прокатанного со степенью обжатия 90% образцов. Фазовый анализ и обработку дифрактограмм методом бесструктурного уточнения [11] осуществляли с использованием программного пакета Diffra<sup>Plus</sup> [12, 13]. В табл. 2 приведены фазовый состав образца до и после обработки, а также параметры кристаллических решеток фаз и размеры областей когерентного рассеяния (ОКР). Из приведенных данных видно, что размер ОКР в интерметаллидной зоне деформированного обр. 3 в 25 раз меньше, а уровень микроискажений решетки в 7 раз больше, чем у исходного обр. 0. Это говорит о повышенной концентрации дефектов и их упорядоченности, что, по нашему мнению, свидетельствует о близости момента фрагментации структуры. Однако, согласно результатам электронной микроскопии, в обр. 3 размер зерна еще находится на уровне

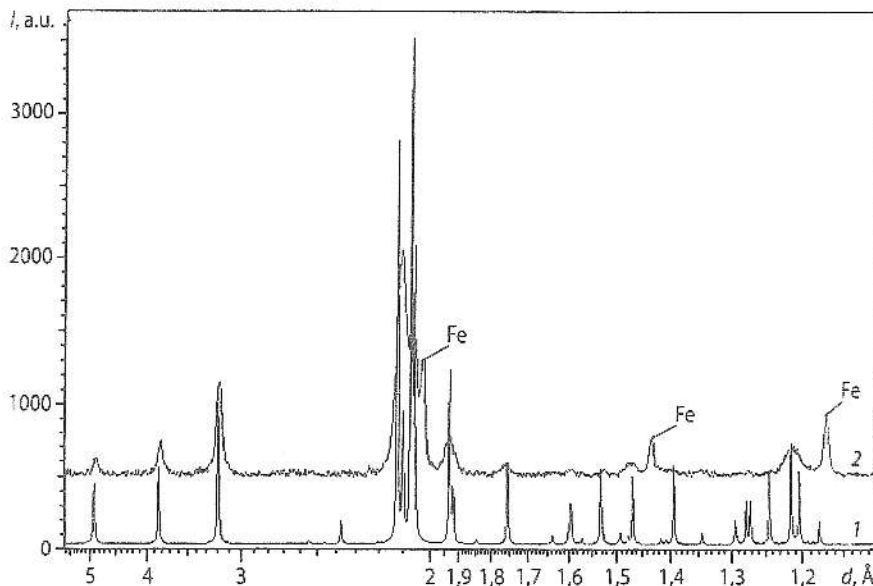


Рис. 4. Дифрактограммы исходного образца (1) и прокатанного с обжатием  $\epsilon = 90\%$  (2)

Таблица 2. Структурные характеристики образцов до и после пластической деформации по данным рентгенофазового анализа

№ обр.	Фаза	Простр. группа	a, нм	b, нм	c, нм	ОКР, нм	Микронапряжения, $10^{-4}$
0	Fe <sub>2</sub> Al <sub>3</sub>	Cmcm	0,7658 (1)	0,6389 (1)	0,4189 (1)	> 1000	< 0,01
3	Fe <sub>2</sub> Al <sub>3</sub>	Cmcm	0,7649 (5)	0,6411 (5)	0,4212 (5)	40	0,07
	Fe	Im-3m	0,2866 (2)	0,2866 (2)	0,2866 (2)	80	0,03

нескольких микрометров, но тем не менее излом в интерметаллидной зоне стал вязкопластичным (рис. 5).

Интерметаллидный слой обр. 6 (серый участок на рис. 6, а) имеет толщину порядка 7–9 мкм. Аллюминиевое покрытие несплошное, и наблюдаются пустоты. Ближе к нему интерметаллид (в составе больше Al, чем Fe) выглядит в виде фрагментов, а со стороны стального слоя (больше Fe, чем Al) – как тонкие чешуйки. Таким образом, исследование структуры интерметаллида при увеличении 50 000<sup>x</sup> выявило размер зерна промежуточного слоя в пределах 46–265 нм, в среднем ~ 150 нм. На рис. 6, б и в представлены структуры алюминиевого покрытия со средним размером зерна 250 нм и стали, в которой средняя ширина волокон составляет 2 мкм.

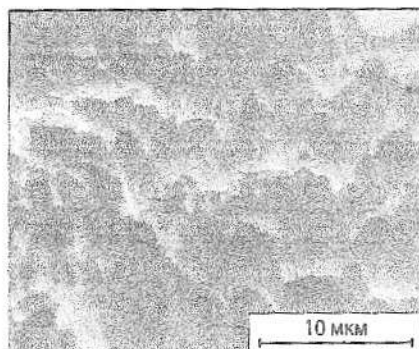


Рис. 5. Фотография поперечного излома промежуточного слоя композита

## ВЫВОДЫ

1. При холодной прокатке СК системы сталь–алюминий с обжатиями выше 50 % получается композит, состоящий из слоя основы (сталь), контактного слоя с фрагментарно расположенными интерметаллическими образованиями длиной 50–200 мкм, отстоящих друг от друга на расстояния 2–50 мкм, и чешуйчатых интерметаллических включений в промежутках между интерметаллическими фрагментами и алюминиевым слоем.

2. Первоначально недеформирующийся интерметаллид, дробясь на фрагменты размером значительно меньшим, чем длина очага деформации, «закупоривается» в алюмостальную матрицу и попадает в напряженное состояние, при котором все главные напряжения близки друг к другу, и, начиная примерно с 50 %-ного обжатия СК, интерметаллид и композит деформируются одинаково.

3. При увеличении степени деформации композита до  $\epsilon \approx 90\%$  ( $e \approx 2,28$ ) промежуточный слой приобретает пластические свойства.

4. В результате проведенной интенсивной пластической деформации  $\epsilon = 96+98\%$  ( $e = 3,5+3,7$ ) алюминий и интерметаллид приобрели субмикроструктуру со средним размером зерна 250 и 150 нм соответственно.

5. Композит в целом имеет пластические свойства, в нем не происходит расслоения при испы-

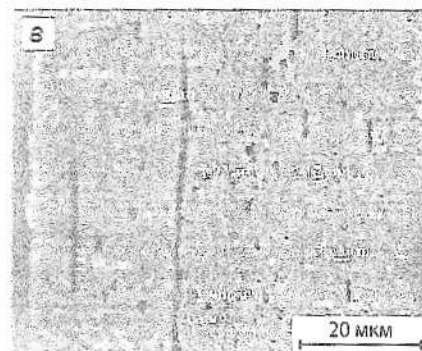
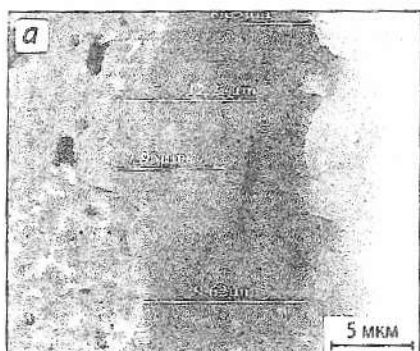


Рис. 6. Структура обр. 6

а – контактный слой + интерметаллид, б – алюминиевое покрытие, в – стальная основа

таниях как на разрыв, так и при изгибе с радиусом, равным толщине СК.

*Структурные исследования методами оптической микроскопии и рентгенофазового анализа проводились на приборах «Урал-3М» Центра коллективного пользования ИМЕТ УрО РАН. Электронно-микроскопические исследования выполнены в Центре коллективного пользования ИФМ УрО РАН.*

*Работа осуществлена при частичной финансовой поддержке РФФИ 09-03-12152-офи<sub>м</sub> и программы Междисциплинарного проекта ИМЕТ и ИФМ УрО РАН.*

## ЛИТЕРАТУРА

1. Андреева А. В. Основы физикохимии и технологии композитов: Учеб. пос. для вузов. М.: ИПРЖР, 2001.
2. Трыков Ю. П., Гуревич Л. М., Шморгунов В. Г. Слоистые композиты на основе алюминия и его сплавов. М.: Metallurg-издат, 2004.
3. Виткин А. И., Тейндл И. И. Металлические покрытия листовой и полосовой стали. М.: Metallургия, 1971.
4. Концевой Ю. В., Игнатьева Е. В., Игнатьев И. Э. и др. // Сталь. 2003. № 4. С. 66–67.
5. Бродова И. Г. // Тр. XII Всерос. конф. «Строение и свойства металлических и шлаковых расплавов» (Екатеринбург, 22–26 сент. 2008 г.). Екатеринбург: УрО РАН, 2008. С. 6–8.
6. Бродова И. Г. // Тез. докл. 3-й Рос. конф. по наноматериалам «НАНО-2009». (Екатеринбург, 20–24 апр. 2009 г.). Екатеринбург: Ур. изд-во, 2009. С. 279–282.
7. Ширинкина И. Г., Бродова И. Г., Кайгородова Л. И. и др. // Там же. С. 396–398.
8. Валиев Р.З. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. М.: Логос, 2000.
9. Карпов М. И., Коржов В. П., Внуков В. И. // Тез. докл. 3-й Рос. конф. по наноматериалам «НАНО-2009». (Екатеринбург, 20–24 апр. 2009 г.). Екатеринбург: Ур. изд-во, 2009. С. 24–26.
10. Пат. 2182191 (РФ). Способ покрытия стальной полосы алюминием / Э. А. Пастухов, Н. А. Ватолин, Ю. В. Концевой и др. 2002.
11. Le Bail A., Duroy H., Fourquet J. L. // Mat. Res. Bull. 1988. Vol. 23. P. 447–452.
12. Diffrac<sup>Plus</sup>. Eva Bruker AXS GmbH, Ostliche. Rheinbruckenstraße 50, D-76187. Karlsruhe, Germany, 2008.
13. Diffrac<sup>Plus</sup>. Topas Bruker AXS GmbH, Ostliche. Rheinbruckenstraße 50, D-76187. Karlsruhe, Germany, 2008.

## Обращаем Ваше внимание

В соответствии со Сводным планом Министерства образования и науки РФ по проведению информационно-выставочных мероприятий на базе российских центров науки и культуры за рубежом, осенью 2011 г. пройдут следующие мероприятия:

- Семинары-выставки «Нанотехнологии» (Белград, 12–18 сентября, Братислава, 19–23 сентября).
- Инновационный форум «Россия–Болгария: Развитие сотрудничества через инновации» (Пловдив, 26–27 сентября).
- Выставки-семинары:
  - «Актуальные направления химической науки» (Армения, 3–9 октября);
  - «Российские технологии» (Люксембург, 18–22 октября);
  - «Энергосберегающие технологии для нефтехимии и экологии» (Вьетнам, 30 октября–4 ноября);
  - «Информационные технологии» (Казахстан, 31 октября–4 ноября).
- Семинар «Развитие механизмов сотрудничества исследовательских инфраструктур России и стран Евросоюза» (Вена, 24–28 октября).

Будут представлены новые инновационные разработки российских институтов, продемонстрированы исследовательские инфраструктуры, обсуждены программы двустороннего сотрудничества по приоритетным направлениям науки и техники.

Программа мероприятий в каждой из стран предусматривает:

- проведение семинаров, заседаний, специализированных секций;
- организацию экспозиции (натурные образцы, планшеты, мультимедийные презентации);
- посещение научно-исследовательских организаций, предприятий, фирм для обмена опытом, проведения переговоров, заключения договоров о сотрудничестве и подписания контрактов.

ЗАО НТА «СВС-Термосинтез» совместно с НИТУ «МИСиС» осуществляют подготовку программы мероприятий и формируют российские делегации.

Условия участия – частичное бюджетное софинансирование.

### Контакты:

Тел./факс: +7 (495) 638-45-19, тел.: +7 (915) 379-65-91

E-mail: [vvzajchikov@mail.ru](mailto:vvzajchikov@mail.ru), [root@imc.misa.ac.ru](mailto:root@imc.misa.ac.ru)

# **Порошковая металлургия**

## **и функциональные покрытия**

**3  
2011**