

*О. В. Слаутин, В. Г. Шморгун, Д. В. Проничев, В. О. Харламов
М. А. Наход, А. И. Богданов, В. П. Кулевич, М. Г. Светлицкий*

**ОЦЕНКА НАЛИПАЕМОСТИ РАЗОГРЕТОГО СЫРЬЯ
НА МЕТАЛЛИЧЕСКОЙ ПОВЕРХНОСТИ С ПОКРЫТИЕМ
ИЗ АЛЮМИНИДОВ ЖЕЛЕЗА В АНОДНОМ ПРОИЗВОДСТВЕ***

Волгоградский государственный технический университет

e-mail: slautin@vstu.ru

В работе экспериментально доказано, что формирование покрытия из интерметаллидов системы Fe-Al на поверхности воронки бункера смесителя анодной массы уменьшает ее налипаемость на стенки воронки, а последнее, с высокой вероятностью, обусловлено сохранением высокой температуры анодной массы за счет низкой теплопроводности контактирующего с ней покрытия.

Ключевые слова: алюминиды железа, анодная масса, налипаемость, теплопроводность, интерметаллиды, покрытие

*O. V. Slautin, V. G. Shmorgun, D. V. Pronichev, V. O. Kharlamov
M. A. Nakhod, A. I. Bogdanov, V. P. Kulevich, M. G. Svetlitsky*

**ASSESSMENT OF THE ADHESION OF HEATED RAW MATERIALS ON A METAL
SURFACE COATED WITH IRON ALUMINIDES IN ANODIC PRODUCTION**

Volgograd State Technical University

It has been experimentally proven that attaching a coating of the Fe-Al system intermetallic compounds on the surface of the funnel of the anode mass mixer hopper reduces sticking to the funnel surface, and the latter, with a high probability, is due to the preservation of the high temperature of the anode mass due to the low thermal conductivity of the coating in contact with it.

Keywords: iron aluminides, anode mass, adhesion, thermal conductivity, intermetallics, coating

© Слаутин О. В., Шморгун В. Г., Проничев Д. В., Харламов В. О., Наход М. А., Богданов А. И., Кулевич В. П., Светлицкий М. Г., 2025.

* Исследование выполнено за счет гранта Российского научного фонда № 24-29-00231, <https://rscf.ru/project/24-29-00231/>.

Введение

Для потребности электролизного производства в современной технологии металлургии алюминия необходимо применение обожженных или инертных анодов [1, 2]. В технологии их изготовления используется разнообразное транспортирующее, пресловое, смешивающее, накопительное и т.п. технологическое оборудование [2]. Условия работы такого оборудования сопряжено с непосредственным контактом металлических поверхностей с разогретым сырьем, например, с анодной массой (АМ) [1, 2]. Особенность технологии изготовления анодов является нахождение АМ в разогретом (не менее 250 °С) состоянии для сохранения вязкости, что и является закономерной причиной повышения склонности ее к налипанию на стенки оборудования на всех этапах переработки (смешивание, формование, прессование и т. д.) [3, 4]. Анализ условий работы такого оборудования показал, что периодическая механическая чистка контактирующих с АМ металлических поверхностей гарантированно приводит к их ускоренному износу, а операция напыления специальной эмульсии для предупреждения налипания АМ предусмотрена по технологическим соображениям только на стенки виброформы и формовочной плиты пуансона при формировании анодов [3].

Разработанная нами технологическая схема [5] получения на поверхности контактирующих с АМ стенках воронки бункера смесителя из углеродистых или низколегированных сталей покрытий (рис. 1) на основе алюминидов железа $FeAl$ и Fe_3Al [6] обеспечивает, как было показано в работе [7], необходимые показатели твердости и износостойкости.

Внутренние поверхности таких изделий (рис. 1) помимо высокой адгезионной прочности и стойкости к абразивному износу, как отмечено в [5, 9, 10], обладают и пониженными значениями теплопроводности. Выявленный факт, должен привести и к понижению склонности к налипанию АМ к стенкам воронки [5], поскольку менее интенсивное их охлаждение за счет теплоотвода сопряжено со снижением вязкости контактирующих с ними фрагментов.

Эксплуатация воронки бункера с алюминидным покрытием внутренних поверхностей в условиях производства показала, что налипание АМ на стенки снижается многократно, а сами поверхности стенок в значительно меньшей степени подвержены износу, как по причине большей твердости алюминидных покрытий (по сравнению со Ст3), так и с отсутствием необходимости периодического удаления АМ механическими способами.



Рис. 1. Воронки накопительных бункеров смесителей анодной массы, используемые на анодной фабрике ОК «РУСАЛ»

Однако в открытой технической литературе практически отсутствуют данные, по оценке налипаемости АМ или подобного ей сырья

к металлическим поверхностям, в частности к покрытиям на основе алюминидов железа, полученных методом сварки взрывом (СВ) с по-

следующей термообработкой (ТО), что и определило постановку настоящего исследования.

Материалы и методы исследования

Процесс получения покрытий системы Fe-Al на поверхности стали Ст3 осуществлялся в соответствии с технологической схемой, представленной в [9].

Технология изготовления воронок бункеров с алюминидным покрытием (рис. 2, а) предусматривает:

- СВ пластин сталь Ст3 + алюминий АД1 по режимам [5], определенным расчетно-экспериментальным методом (табл. 1);
- правку биметаллических листов размером 900×850 мм;
- вырезку до требуемой трапециевидальной формы (рис. 2, б);
- ТО, позволяющую сформировать плотное и равнопрочное со стальной основой покрытие на основе алюминидов железа;
- последующую сборку с применением аргоно-дуговой сварки, как показано на рис. 2, б.

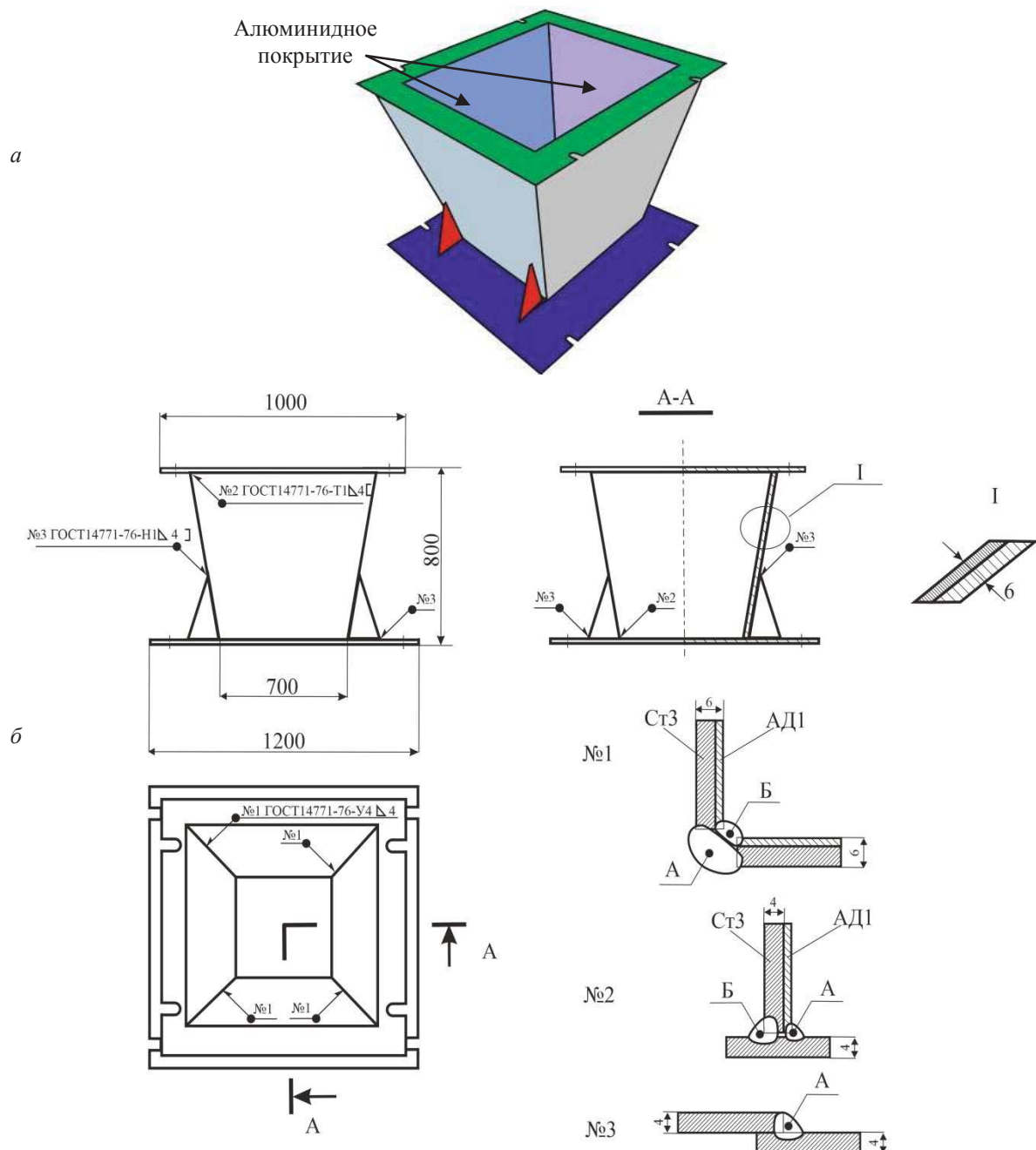


Рис. 2. Участки внутренних поверхностей с нанесенным алюминидным покрытием (а) воронки накопительного бункера смесителя анодной массы (схема); сборочный чертеж воронки (б)

Таблица 1

Технологические параметры СВ для получения 2-слойного стале-алюминиевого биметалла

Свариваемые слои	Толщина слоев, $\delta_{сл}$ (мм)	Взрывчатое вещество	Высота заряда ВВ, Н (мм)	Зазор, h (мм)
АД1	2,0	Аммонит 6ЖВ (67 %) + кварцевый песок (33 %)	16	2,0
Ст3	3,0			

Аргонно-дуговую сварку элементов из стали Ст3 на постоянном токе прямой полярности 100–120 А проводили с использованием присадочной проволоки Св-08Г2С. Сварку слоев из алюминиевой плакировки выполняли на переменном токе 80–100 А частотой ≈ 100 Гц с использованием присадочной проволоки Св-АМГ5. Заполнение разделки проводили обратно (ступенчатым) способом участками по 200 мм.

Металлографические исследования проводилось с помощью оптической микроскопии (Olympus BX61), электроннооптические исследования проводили на растровом двухлучевом электронном микроскопе Versa 3D Dual Beam. Химический анализ поверхности воронок бункера смесителя осуществляли с помощью рентгенофлуоресцентного спектрометра Shimadzu EDX-8000 и рентгеноструктурного дифрактометра Bruker D8 Advance.

Результаты и их обсуждение

Выявленный факт снижения налипаемости АМ к стенкам воронок подтверждается, помимо визуального осмотра внутренних поверхностей бункеров, результатами анализа вырезанных образцов из пластин воронок (с алюминиевым покрытием и без) с фрагментами прилипшей АМ.

Так, анализ СЭМ-изображений (рис. 3) показал, что на поверхности образцов из Ст3 наблюдается достаточно обширная область фрагментов прилипшей АМ, суммарная доля которой по площади составляет до 40–50 % (рис. 3, а, в, д, ж). Процесс налипания наиболее активно происходит в царапинах (микробороздках), которые являются следствием предшествующих чисток механическим путем самих внутренних поверхностей воронок.

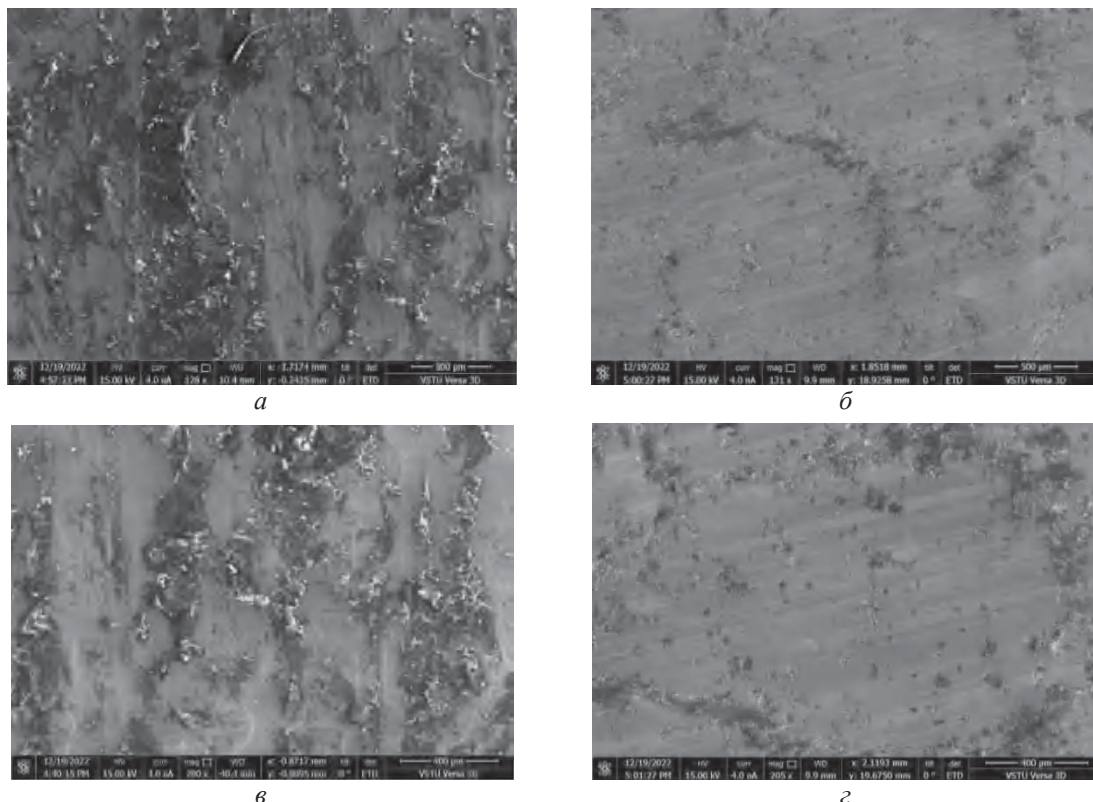


Рис. 3. СЭМ-изображение внутренней поверхности воронки бункера, подвергнутой воздействию АМ в процессе загрузки:

а, в, д, ж – без покрытия (Ст3); б, г, е, з – с алюминиевым покрытием. Области определения элементного состава – ж, з (данные по химическому составу – в табл. 2). $\times 130$ (а, б); $\times 200$ (в, г); $\times 400$ (ж); $\times 2000$ (д, е, з). См. также с. 25

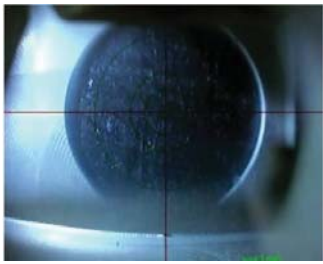
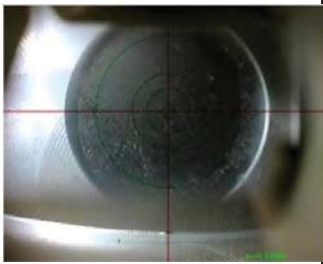
Снижение налипания АМ, если пренебречь фактором разности в значениях адгезии самой АМ к поверхности (с покрытием и без, т. е. Ст3), по нашему мнению, является следствием низких значений теплопроводности покрытия на основе алюминидов железа. Последнее препятствует интенсивной теплопередаче через стенки воронки и в значительной мере уменьшает потерю температуры АМ, контактирующей с ними. Это, в свою очередь, не приводит к повышению вязкости АМ и снижает ее способность к налипанию. В результате потребность в механической очистке стенок воронки сокращается многократно.

Косвенным подтверждением выявленных особенностей исследованных поверхностей воронок с алюминидным покрытием и без такового в идентичных областях сканирования являются результаты энергодисперсионного анализа на рентгенофлуоресцентном спектрометре Shumadzu EDX-8000 (табл. 3) и рентгеноструктурного анализа (рис. 4).

Так доля АМ, имеющая сложный органический состав, регистрируется как «Plastic» (табл. 3), а соотношение остальных элементов имеет сопоставимый характер, выявленный с помощью микроскопа Versa 3D и указанный в табл. 2.

Таблица 3

Химический состав поверхности воронки бункера для перемешивания АМ, выявленный после ее эксплуатации (по данным энергодисперсионного рентгенофлуоресцентного спектрометра Shumadzu EDX-8000)

Поверхность сканирования образцов			
Микроструктура области сканирования	Ст3 (без покрытия) с характерными участками		Алюминидное покрытие
	без налипания АМ	с фрагментами АМ	
			
Элемент, %			
Fe	97,444	0,204	37,969
Al	0,019	0,014	60,524
Mn	0,456	0,001	0,244
Si	0,198	0,003	0,424
Ca	0,106	0,012	0,154
S	0,601	1,217	0,458
Cu	0,025	0,005	0,065
Cr	0,032	0,006	0,025
Plastic (AM)	1,119	98,538	0,136

Анализ дифрактограмм, полученных при РСА исследуемой поверхности воронки бункера (рис. 4), позволил установить следующее. На дифрактограмме, полученной от образца без покрытия (Ст3), наблюдаются рефлексы (рис. 4, а), соответствующие стальной основе воронки, и рефлексы графита. На дифрактограмме от образца с покрытием (рис. 4, б), помимо рефлексов графита, присутствует набор

рефлексов, соответствующий алюминиду Al_3Fe_2 . При этом рефлексы от Fe отсутствуют ввиду достаточной толщины покрытия. При прочих равных условиях более интенсивные рефлексы графита, наблюдаемые на дифрактограмме образца без покрытия, могут свидетельствовать о более высоком содержании последнего на поверхности исходной воронки бункера после рабочих испытаний.

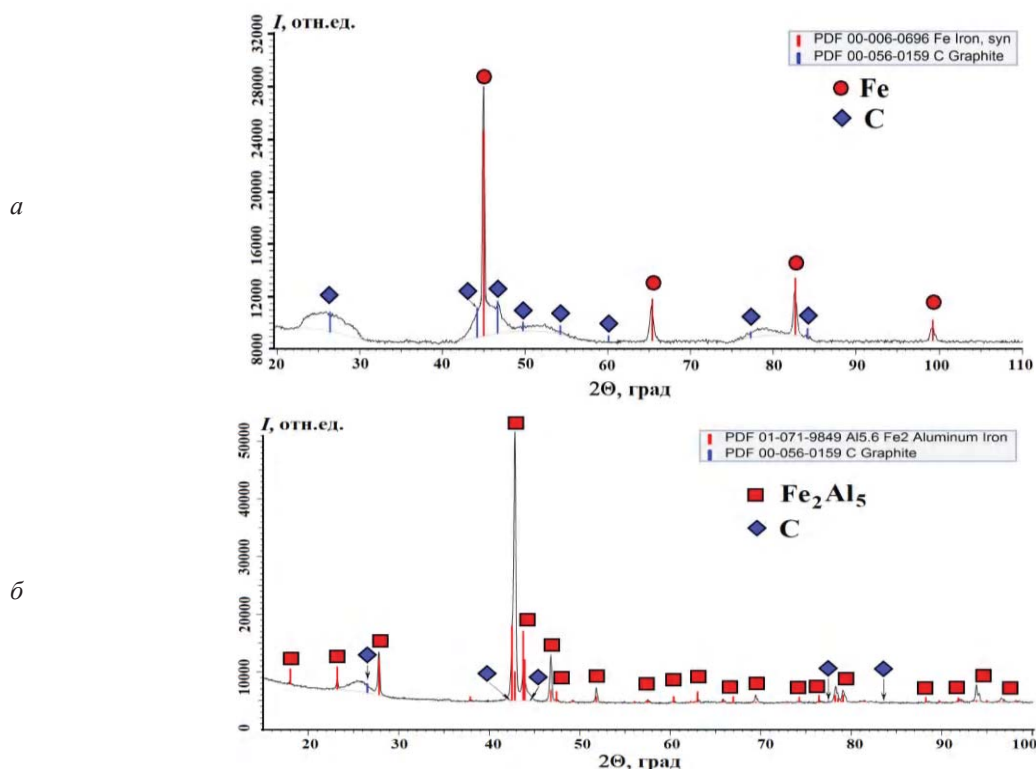


Рис. 4. Дифрактограммы, полученные с внутренней поверхности воронки бункера смесителя после воздействия анодной массы (а – без покрытия, Ст3; б – алюминиевое покрытие)

Вывод

Проведенные исследования показали, что формирование износостойких алюминиевых покрытий на воронках бункеров смесителей анодной массы позволяет повысить их ресурс и увеличить срок их эксплуатации за счет минимизации налипания анодной массы, что обусловлено снижением теплопроводности стенки бункера, приводящей к уменьшению потери температуры и вязкости контактирующей с ней анодной массы, а следовательно, выявленный эффект приводит и к сокращению периодичности очистки внутренних поверхностей воронки.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Минцис, М. Я. Электрометаллургия алюминия / М. Я. Минцис, П. В. Поляков, Г. А. Сиразутдинов. – Новосибирск : Наука, 2001. – 368 с.
2. Троцкий, И. А. Metallurgy of aluminum / И. А. Троцкий, В. А. Железнов. – Москва : Metallurgy. – 1977. – 392 с.
3. Янко, Э. А. Аноды алюминиевых электролизеров / Э. А. Янко. – М. : Издательский дом «Руда и металлы», 2001. – 674 с.
4. S. A. Ageel, A. M. Saleem, B. B. Farhad M. Abdul Mujeebu and, J. M. Alalkawi Cold Extrusion of Carbon Electrodes Using Dies of CRHS Concept and Performance Analysis, Modern Applied Science (Journal of Canadian Center of Science and Education), 2009, Vol. 3, No. 3, pp. 44-54.
5. Слаутин, О. В. Оценка теплопроводности покрытий на основе алюминидов железа / О. В. Слаутин // Из-

вестия ВолгГТУ : научный журнал № 10 (293) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2024. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 6–10. – DOI: 10.35211/1990-5297-2024-10-293-6-10.

6. Shmorgun V. G., Slautin O. V., Kulevich V. P. Features of diffusion interaction in steel-aluminum composite after explosive welding and aluminizing by melt immersion // Metallurgist. – 2019. – T. 63. – С. 766-774.

7. Шморгу́н, В. Г. Оценка износостойкости слоистых FeAl/Fe₃Al/Fe(Al) покрытий / В. Г. Шморгу́н, О. В. Слаутин, В. П. Кулевич, Д. В. Проничев, С. А. Кузнецов // Metallurg. – 2024. – № 1. – С. 74–78. – DOI: 10.52351/00260827_2024_1_74.

8. Оценка теплопроводности полученных сваркой взрывом биметаллов состава сталь Ст3 + алюминий АД1 после их термообработки с использованием ультразвукового воздействия / Д. В. Проничев, О. В. Слаутин, В. П. Кулевич, С. А. Кузнецов, И. А. Соколенко // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 2 (273) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2023. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 15–19. – DOI: 10.35211/1990-5297-2023-2-273-15-19.

9. Износостойкие слоистые покрытия из алюминидов железа на углеродистой стали / О. В. Слаутин, В. Г. Шморгу́н, Д. В. Проничев, С. А. Кузнецов // XXII Менделеевский съезд по общей и прикладной химии (ф. т. Сириус, 7–12 октября 2024 г.) : сб. тез. докл. В 7 т. Т. 2 / РХО им. Д. И. Менделеева [и др.]. – Москва, 2024. – С. 99.

10. Шморгу́н, В. Г. Исследование износостойкости покрытий на основе алюминидов железа, сформированных на стальных поверхностях / В. Г. Шморгу́н, О. В. Слаутин, В. П. Кулевич, С. А. Кузнецов, М. Д. Романенко // Известия ВолгГТУ : научный журнал № 6 (289) / ВолгГТУ. – Волгоград, 2024. – (Серия «Проблемы материаловедения, сварки и прочности в машиностроении»). – С. 24–29. – DOI: 10.35211/1990-5297-2024-6-289-24-29.