

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-629427>

Оригинальное исследование



Экспериментальное исследование алюминиевых материалов и их сварных соединений на соответствие требованиям пассивной безопасности кабин сельскохозяйственной и дорожно-строительной техники при опрокидывании по ГОСТ ISO 3471-2015

Д.С. Вдовин, Д.А. Александров, Н.В. Синюков, Д.Н. Рудьков

Московский государственный технический университет имени Н.Э. Баумана (национальный исследовательский университет), Москва, Российская Федерация

АННОТАЦИЯ

Обоснование. В настоящее время для сельскохозяйственной и дорожно-строительной техники широкое распространение получили кабины с интегрированными силовыми элементами, защищающими оператора при опрокидывании. Одним из способов существенного снижения массы защитного силового каркаса кабин является применение алюминиевых сплавов, однако, при этом возникают проблемы с механическими свойствами алюминия в зоне сварного соединения. Появившиеся в последнее время технологии трёхмерной печати алюминиевых сплавов позволяют получать конструкции сложной формы, обладающие большой пластичностью и ударной вязкостью. Тем не менее, применение таких материалов при конструировании каркасов кабин требует дополнительных исследований на соответствие требованиям пассивной безопасности ГОСТ ISO 3471-2015.

Цель — исследовать напряженно-деформированное состояние состояния образцов алюминиевых сплавов и их сварного соединения и оценить их соответствие требованиям пассивной безопасности ГОСТ ISO 3471-2015.

Методы. В работе использован экспериментально-расчётный метод исследования. При проведении эксперимента используются разрывная машина и маятниковый копер.

Результаты. Получены механические характеристики образцов из алюминия, изготовленных аддитивным методом, а также их сварных соединений и установлена их степень соответствия требованиям пассивной безопасности кабин по ГОСТ ISO 3471-2015.

Заключение. На основании проведённого исследования сделан положительный вывод о возможности использования алюминия и его сварных соединений в защитных конструкциях кабин сельскохозяйственной и дорожно-строительной техники.

Ключевые слова: напряженно-деформированное состояние; ударная вязкость; пластичность; устройства защиты при опрокидывании; кабина; сельскохозяйственная и дорожно-строительная техника.

Как цитировать:

Вдовин Д.С., Александров Д.А., Синюков Н.В., Рудьков Д.Н. Экспериментальное исследование алюминиевых материалов и их сварных соединений на соответствие требованиям пассивной безопасности кабин сельскохозяйственной и дорожно-строительной техники при опрокидывании по ГОСТ ISO 3471-2015 // Тракторы и сельхозмашины. 2024. Т. 91, № 5. С. 584–595. DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-629427>

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-629427>

Original Study Article

Experimental study of aluminum alloys and their welded joints for compliance with roll-over protection structures requirements according to the GOST ISO 3471-2015

Denis S. Vdovin, Dmitry A. Aleksandrov, Nikita V. Sinyukov, Dmitry N. Rudkov

Bauman Moscow State Technical University, Moscow, Russian Federation

ABSTRACT

BACKGROUND: Nowadays, cabins of agricultural and construction machinery with integrated roll-over protecting structures are widely used. Using aluminum alloys is one of the ways for significant weight reduction of these load-bearing structures; however, there are issues with mechanical properties of aluminum in the welded joint zone. The recently appeared additive technologies for aluminum alloys help to obtain structures with complex shape that demonstrate high ductility and impact toughness. However, their application in development of roll-over protecting structures requires additional research to determine compliance with passive safety requirements according to the GOST ISO 3471-2015.

AIM: To study the stress-strain state of aluminum alloy specimens and their welded joint for compliance with passive safety requirements according to the GOST ISO 3471-2015.

METHODS: The experiment-simulation approach is used in this study. A universal tensile machine and an impact testing machine are used in the experiment.

RESULTS: The mechanical properties of the samples made of 3D-printed aluminum alloys and their welded joints were obtained. Their degree of compliance with passive safety requirements according to the GOST ISO 3471-2015 was established.

CONCLUSION: According to the conducted study, the potential for use of 3d-printed aluminum alloys and their welded joints in rollover protection structures of cabins in agricultural and construction machinery is confirmed.

Keywords: stress-strain state; impact toughness; plasticity; rollover protection structures; cabin; agricultural and construction machinery.

To cite this article:

Vdovin DS, Alexandrov DA, Sinyukov NV, Rudkov DN. Experimental study of aluminum alloys and their welded joints for compliance with roll-over protection structures requirements according to the GOST ISO 3471-2015. *Tractors and Agricultural Machinery*. 2024;91(5):584–595.

DOI: <https://doi.org/10.17816/0321-4443-629427>

Received: 25.03.2024

Accepted: 24.11.2024

Published online: 24.11.2024

ВВЕДЕНИЕ

Большинство сельскохозяйственных и промышленных тракторов, автомобилей, дорожно-строительной техники, выпущенной после 1980-ых гг., оснащены устройствами защиты при опрокидывании (ROPS — rollover protection structures) для обеспечения безопасности оператора. Исследование аварий с опрокидыванием показало, что ROPS наряду с использованием ремней безопасности может предотвратить травмы или смерть в случае опрокидывания или переворачивания машины. Основные технические требования, предъявляемые устройствам защиты при опрокидывании, а также требования, предъявляемые к материалу ROPS, приведены в ГОСТ ISO 3471-2015 [1].

В последнее время большое распространение получили интегрированные стальные защитные конструкции (рис. 1) в связи с широким использованием закрытых кабин и усовершенствования уровня комфорта и безопасности сельскохозяйственной и дорожно-строительной техники.

Проектирование таких конструкций — сложная задача, в ходе которой требуется обеспечить одновременное соответствие не только требованиям стандартов безопасности, но и множеству других требований, например, требованиям эргономики, дизайн-проекта, удобства монтажа и ремонта и т.п. Кроме того, стальной защитный каркас вносит значительный вклад в массу кабины (обычно — около половины массы всей кабины). В статье [2] приводится метод проектирования, позволяющий снизить трудоёмкость конструкторских работ, а также получить надёжную конструкцию защитного каркаса с минимизацией его массы. Для снижения массы кабин также используется технология склеивания тонкостенных профилей, которая в отличие от сварки позволяет использовать в каркасе профили с очень тонкими стенками [3].

В качестве перспективного направления в кабиностроении можно рассмотреть применение алюминиевых сплавов [4]. Алюминиевые сплавы имеют следующие преимущества: высокая удельная прочность; коррозионная стойкость; сохранение показателей ударной вязкости и пластичности при низких температурах. Кроме того, применение алюминиевых сплавов в защитных конструкциях позволяет снизить массу каркаса кабины практически в два раза. Но, при этом, обычно возникают проблемы с низкими механическими свойствами алюминия в зоне сварного соединения, что сдерживает широкое применение алюминия в таких конструкциях. Для повышения характеристик сварного шва применяют различные технологии сварки — ручная или роботизированная дуговая, лазерная ручная или роботизированная, в статьях [5–6] исследуются свойства сварного шва при сварке трением с перемешиванием.

В последнее время все большее распространение получают конструкции, изготовленные аддитивным способом. В статье [7] исследуются механические характеристики

алюминиевого сплава, полученного с помощью наплавки из проволоки АМг5. Высокая пластичность и ударная вязкость напечатанного указанным способом алюминия может позволить использовать данный материал в конструкциях ROPS, чему и посвящена данная работа. Целью данной работы является — оценка достаточности ударной вязкости и пластичности алюминиевых материалов, полученных 3д-печатью, а также их сварных соединений для удовлетворения предъявляемым требованиям к материалу конструкции ROPS по ГОСТ ISO 3471-2015.

Полученные механические характеристики дадут возможность не только выполнить проверку соответствия прямым требованиям к материалу защитных каркасов, но выполнять в будущем расчёты методом конечных элементов и проектирование на основе метода топологической оптимизации при разработке алюминиевых кабин, примерами таких работ служат, например [2, 8, 9].

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ

Для испытаний были выбраны следующие алюминиевые сплавы: АМг5 листовой, сплав 6082Т4 экструдированный, сплав АМг5, напечатанный согласно технологии,

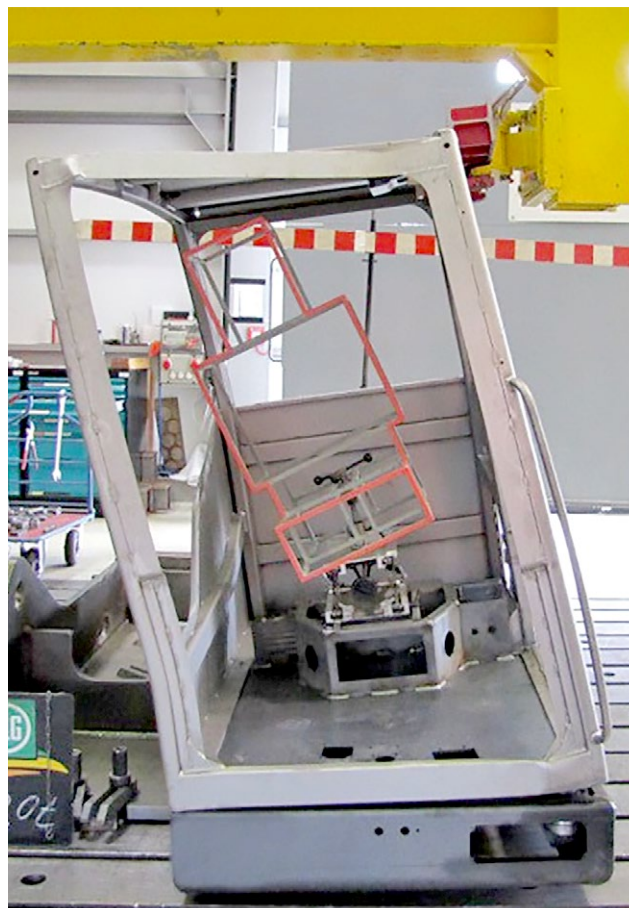


Рис. 1. Интегрированная защитная конструкция во время испытаний.

Fig. 1. The integrated rollover protective structure during testing.

указанной в [7]. Напечатанная заготовка для образцов показана на рис. 2. Габаритные размеры пластины 210x65x9 мм.



Рис. 2. Напечатанная пластина из сплава АМг5.
Fig. 2. The aluminum plate printed of the AMg5 alloy.



Рис. 3. Сваренные пластины из напечатанного АМг5 и сплава 6082Т4 (слева) и напечатанного АМг5 и листового АМг5 (справа).
Fig. 3. The welded plates: the printed AMg5 alloy + the 6082T4 alloy (left) and the printed AMg5 alloy + the sheet of the AMg5 alloy (right).

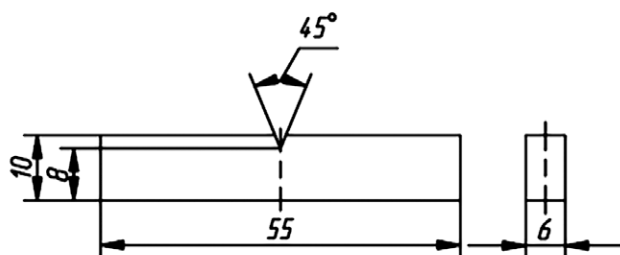


Рис. 4. Размеры, мм, типового образца для испытания на ударную вязкость.
Fig. 4. Dimensions of the impact strength test samples, mm.

Данные материалы были выбраны исходя из следующих соображений:

- напечатанный сплав АМг5 обладает высокой пластичностью;
- сплав 6082Т4 используется для высокопроизводительного производства экструдированных профилей и обладает хорошей пластичностью;
- сплав АМг5 в листах широко распространён и может использоваться для изготовления каркаса кабины в случае изготовления профилей защитного каркаса из гнутых листов.

Напечатанная заготовка из сплава АМг5 была разделена и сварена с листовым сплавом АМг5 и сплавом 6082Т4 ручной лазерной сваркой (рис. 3) для образцов, испытываемых на растяжение, и в среде защитных газов для образцов, испытываемых на ударную вязкость. Термическая обработка образцов после сварки не проводилась, с образцов было снято усиление шва, а также поверхностные неровности после печати при помощи механической обработки поверхности образца. Размеры образцов и их последующая механическая обработка выбирались для испытания по [1] и ГОСТ 6996-66 [10].

Эскиз образца с размерами для испытания на ударную вязкость приведён на рис. 4.

Эскизы и фотографии образцов для испытания на растяжение приведены на рис. 5–7.

Эксперимент по определению механических свойств при растяжении и ударной вязкости образцов проводился согласно методике, описанной в [10] и ГОСТ 9454-78 [11]. При проведении эксперимента на ударную вязкость образцы охлаждались выдержкой в жидком азоте до температуры $-30\text{ }^{\circ}\text{C}$. Контроль температуры образцов проводился контактной термопарой.

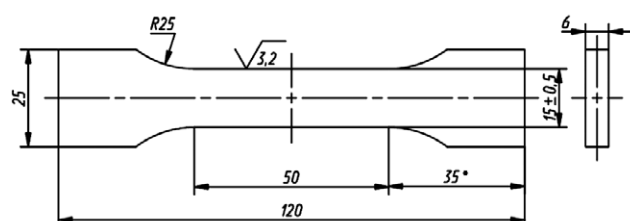


Рис. 5. Размеры, мм, образца для испытания на растяжение: сварка напечатанного АМг5 и сплава 6082Т4.
Fig. 5. Tensile test samples: welded plates of the printed AMg5 alloy and the 6082T4 alloy, dimensions in mm.

При проведении эксперимента использовалось следующее оборудование:

- универсальная испытательная машина Zwick/Roell серии Allround Z100, предназначенная для измерений силы и перемещения при испытаниях образцов на растяжение, сжатие и изгиб (рис. 8а);

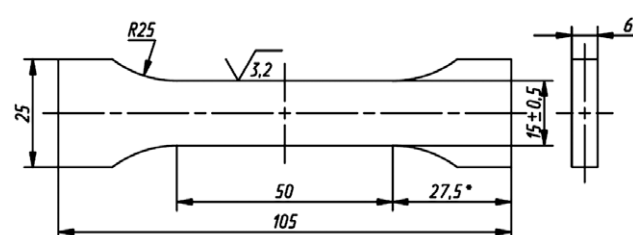


Рис. 6. Образец для испытания на растяжение: напечатанный алюминий AMg5 и листовой AMg5.

Fig. 6. Tensile test samples: welded plates of the printed AMg5 alloy and the sheet of the AMg5 alloy.

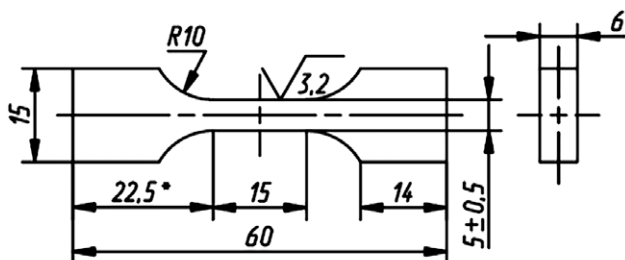
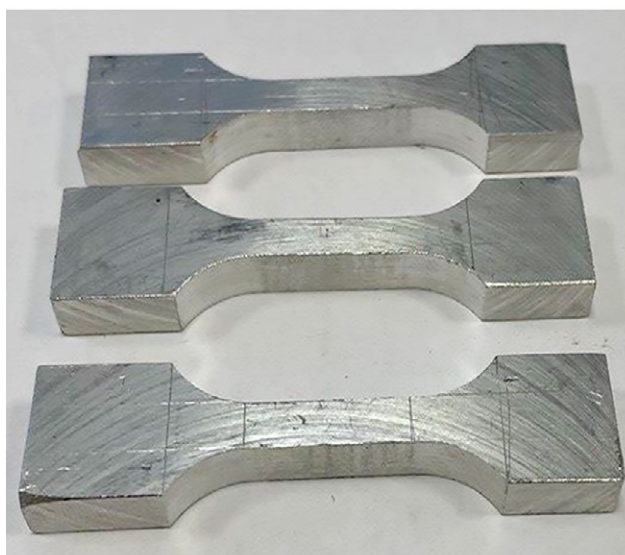


Рис. 7. Образец для испытания на растяжение: напечатанный алюминий AMr5.

Fig. 7. Tensile test samples: the printed AMg5 alloy.



a



b

Рис. 8. Испытательное оборудование: *a* — универсальная испытательная машина Zwick/Roell серии Allround Z100; *b* — маятниковый копер МК-30.

Fig. 8. Test equipment: *a* — the Zwick/Roell Allround Z100 series universal testing machine, *b* — the MK-30 pendulum-type impact testing machine.

- маятниковый копер МК-30 с переменным запасом энергии до 30 кгм, предназначенный для испытания материалов на ударную вязкость (рис. 8б).

РЕЗУЛЬТАТЫ

Результаты эксперимента на ударную вязкость приведены в табл. 1, где В — ширина, Н — высота сечения образца (без учета надреза), S — площадь поперечного сечения в месте концентратора (с учетом V-образного надреза 2 мм), К — работа удара, Кср — среднее значение работы удара, KCV — ударная вязкость с V-образным концентратором, KCVср — среднее значение ударной вязкости с V-образным концентратором.

Полученные результаты сравниваются с требованиями по ударной вязкости, приведёнными в [1]. Данные требования распространяются на основной материал, а не на сварное соединение, но поскольку механические характеристики в зоне сварного шва алюминия ухудшаются, то при удовлетворении сварного шва требованиям по ударной вязкости предполагается, что основные материалы сваренного образца также будут удовлетворять им.

Согласно требованиям ГОСТ ISO 3471-2015 для образца с размерами сечения 10х6 мм поглощаемая энергия при температуре -30°С должна составлять 8 Дж. Следовательно, можно сделать вывод, что сварные соединения образцов из алюминиевых сплавов 6082Т4 и листового АМг5, а также из напечатанного алюминия и листового АМг5 соответствуют требованиям ударной вязкости. Сварное соединение сплава 6082Т4 и напечатанного алюминия ниже требований на 26,5% и не удовлетворяет им. Фотографии разрушенных образцов после испытания на ударную вязкость приведены на рис. 9.

Диаграммы напряжение-деформация при проведении эксперимента на растяжение печатных образцов без сварного шва и фотографии разорванных образцов показаны на рис. 10 и 11 соответственно, сварных образцов из напечатанного алюминия и листового АМг5, напечатанного

алюминия и сплава 6082Т4, показаны на рис. 12–15 соответственно.

Значения предела прочности, условного предела текучести и относительного удлинения при разрыве всех образцов показаны в табл. 2.

По фотографиям образцов после испытаний на растяжение видно, что сварные швы всех образцов обладают некоторыми дефектами (неполный провар, шаровидные включения). С данными дефектами можно бороться подбором режимов сварки. Тем не менее, сварные швы для сплава АМг5 напечатанного и АМг5 листового показывают достаточно хорошие механические свойства. Условный предел текучести снизился на 12%, предел прочности на 6%, а относительное удлинение при разрыве на 27% по сравнению с металлом без сварки. У сварного

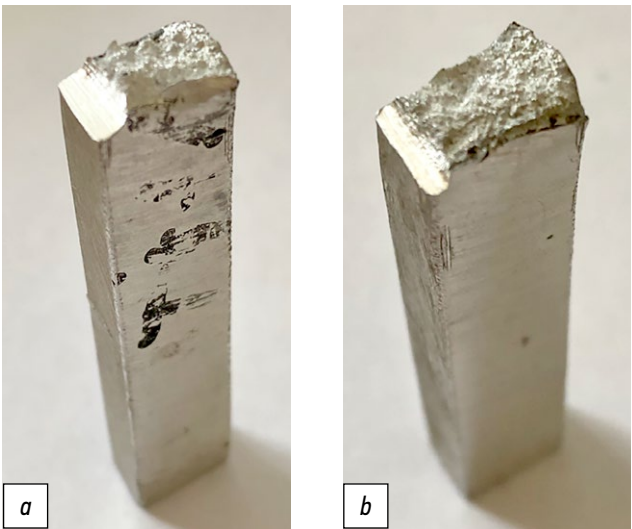


Рис. 9. Разрушенные образцы после испытания на ударную вязкость: а — 6082Т сваренный с напечатанным алюминием; б — АМг5, сваренный с напечатанным алюминием.

Fig. 9. The destroyed samples after the impact strength test: а — the 6082Т4 alloy welded with the printed АМg5 alloy, b — the АМg5 alloy welded with the printed АМg5 alloy.

Таблица 1. Ударная вязкость образцов

Table 1. Impact strength of the samples

Материалы образца	Данные с копра, кгм	Размеры образца			К, Дж	Кср, Дж	KCV, Дж/мм²	KCVср, Дж/мм²
		Н, мм	В, мм	S, мм²				
6082Т4+АМг5 листовой*	1.2	10	6	48	11.77		0.25	
	1.0	10	6	48	9.81	11.77	0.20	0.18
	1.4	10	6	48	13.73		0.29	
6082Т4+Печать	0.4	10	6	48	3.92		0.08	
	0.8	10	6	48	7.85	5.88	0.16	0.12
	0.6	10	6	48	5.88		0.12	
Печать+ +АМг5 листовой	2.2	10	6	48	21.57		0.45	
	2.0	10	6	48	19.61	19.94	0.41	0.42
	1.9	10	6	48	18.63		0.39	

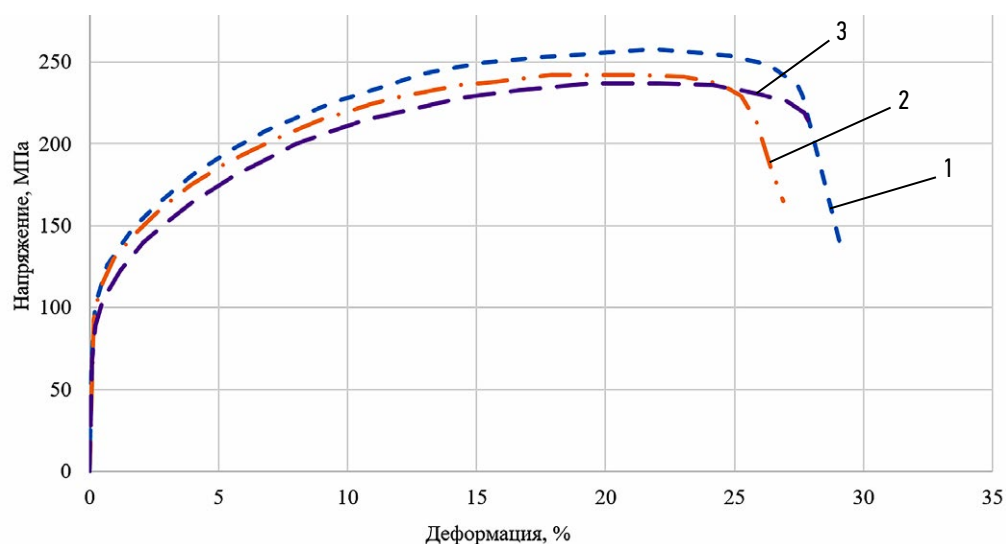


Рис. 10. Зависимость напряжения, МПа, и деформации, %, при испытании на растяжение образцов из напечатанного алюминия (образец материала без сварки): 1 — образец № 1; 2 — образец № 2; 3 — образец № 3.

Fig. 10. Stress-strain diagram, (MPa and %), in the tensile test for the printed aluminum specimens without welding: 1 — specimens № 1; 2 — specimens № 2; 3 — specimens № 3.

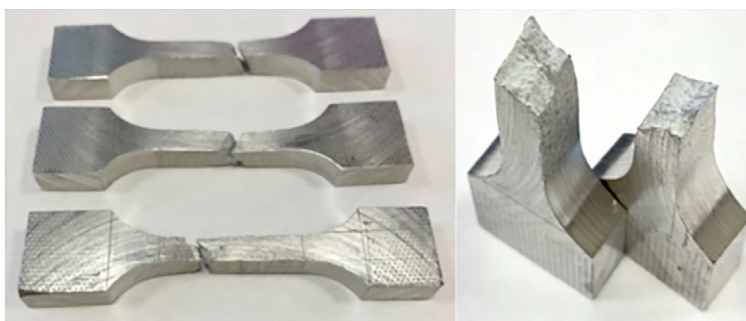


Рис. 11. Разорванные образцы из напечатанного алюминия (образец материала без сварки).

Fig. 11. Printed aluminum samples (no welding) after the tensile test.

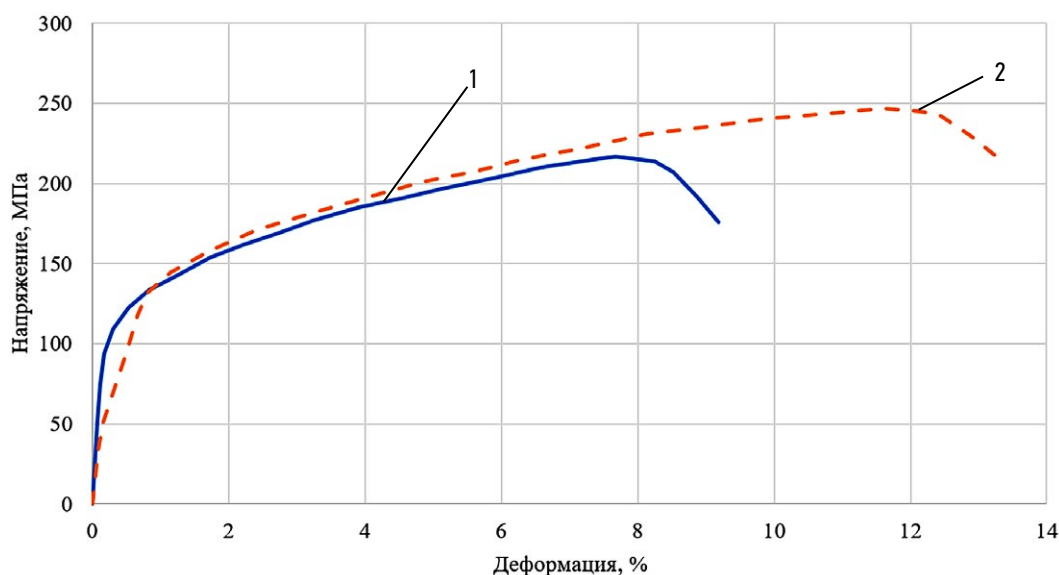


Рис. 12. Зависимость напряжения, МПа, и деформации, %, при испытании на растяжение образцов из напечатанного алюминия, сваренного с листовым АМг5: 1 — образец № 1; 2 — образец № 2.

Fig. 12. Stress-strain diagram, (MPa and %), in the tensile test for welded samples of the printed AMg5 alloy and the sheet AMg5 alloy: 1 — specimens № 1; 2 — specimens № 2.

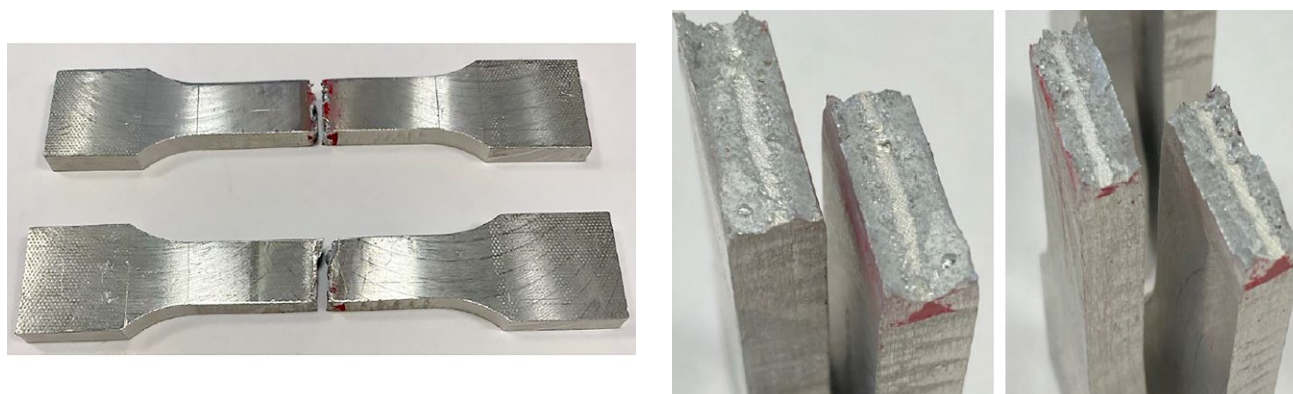


Рис. 13. Разорванные образцы из напечатанного алюминия, сваренного с листовым АМг5.

Fig. 13. Welded samples of the printed AMg5 alloy and the sheet AMg5 alloy after the tensile test.

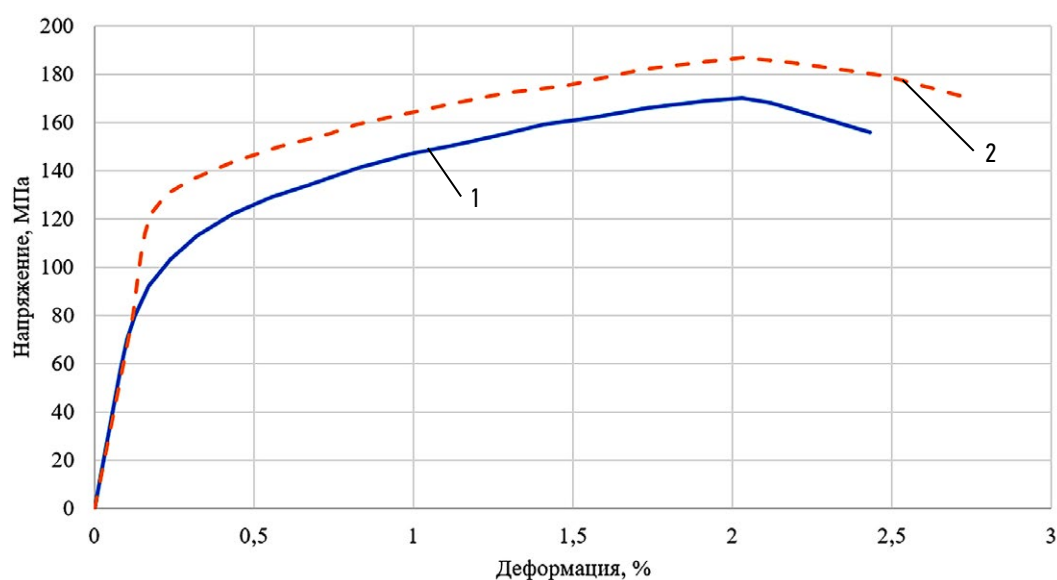


Рис. 14. Зависимость напряжения, МПа, и деформации, %, при испытании на растяжение образцов из напечатанного алюминия, сваренного с 6082Т4: 1 — образец № 1; 2 — образец № 2.

Fig. 14. Stress-strain diagram, (MPa and %), in the tensile test for welded samples of the printed AMg5 alloy and the 6082T4 alloy: 1 — specimens № 1; 2 — specimens № 2.

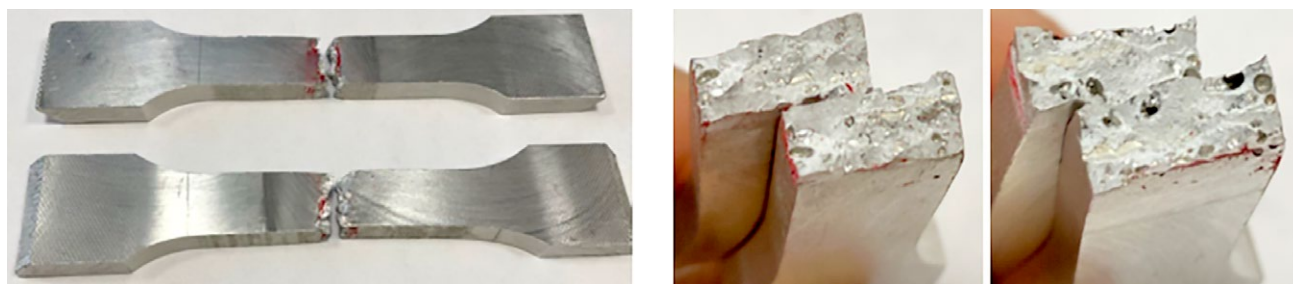


Рис. 15. Разорванные образцы из напечатанного алюминия, сваренного с 6082Т4.

Fig. 15. Welded samples of the printed AMg5 alloy and the 6082T4 alloy after the tensile test.

шва 6082Т4 и напечатанного АМг5 предел прочности снизился незначительно (на 13%), однако, значительно упало относительное удлинение при разрыве (в 5,4 раза), что косвенно подтверждается и результатами испытаний на ударную вязкость этого же сварного шва. Необходимо заметить, что количество образцов, представленных в табл. 2 — мало для корректной статистической обработки, однако все полученные значения дают хороший прогноз на механические свойства при проведении полноценных испытаний на большом количестве образцов.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Оценка возможности использования исследуемых в работе алюминиевых сплавов и их соединений для изготовления защитных каркасов кабин проведена по двум критериям: ударной вязкости и пластичности. Требования к ударной вязкости материалов каркасов кабин (но не соединений) явно указаны в ГОСТ ISO 3471-2015. Требования к пластичности материалов (но не соединений) в ГОСТ ISO 3471-2015 указаны косвенно: через ограничение максимального содержания углерода в сталях не более 0,2%. Таким образом можно сделать вывод, что ГОСТ ISO 3471-2015 ориентирован, в основном, на применение сталей в качестве материалов защитных каркасов кабин. Однако, ориентировочные значения ударной

вязкости и величины пластичности могут быть использованы для качественной и количественной сравнительной оценки сталей и алюминиевых сплавов. Дополнительно к сравнению показателей ударной вязкости и свойств пластичности основного материала каркаса кабины — алюминия или стали — важно оценить эти показатели и для их сварных соединений, хоть это и не требуется стандартом, поскольку в алюминиевых сварных швах механические свойства, как правило, значительно ниже, чем свойства основного алюминиевого сплава до сварки.

Сегодня основными материалами для защитных каркасов кабин являются низкоуглеродистые стали, например: 09Г2С, 10ХСНД, Сталь 20, которые обладают высокой пластичностью с предельным относительным удлинением при разрыве в диапазоне от 19% до 28%. Испытанные образцы из напечатанного алюминия тоже имеют большое относительное удлинение при разрыве — 28% и, таким образом, по критерию высокой пластичности — *могут использоваться в защитных конструкциях*.

Сварное соединение напечатанного алюминия и листового АМг5 удовлетворяет требованиям по ударной вязкости, приведёнными в стандарте на пассивную безопасность кабин по ГОСТ ISO 3471-2015. Поскольку сварное соединение всегда имеет худшие механические свойства, чем основной металл, то можно сделать вывод, что и напечатанный АМг5 сам по себе имеет достаточную ударную

Таблица 2. Результаты эксперимента на растяжение образцов

Table 2. Results of the samples tensile test

№ образца	Условный предел текучести, Мпа	Предел прочности, МПа	Относительное удлинение при разрыве, %
<i>Образцы из напечатанного алюминия (без сварки)</i>			
1	110	257	29
2	109	240	27
3	98	239	28
Средние значения	105,7	245,3	28
<i>6082Т4 без сварного шва *</i>			
-	110	205	14
<i>АМг5 без сварного шва **</i>			
-	130	275	15
<i>Образцы из напечатанного алюминия, сваренного с 6082Т4</i>			
1	117	170	2,4
2	142	187	2,7
Средние значения	129,5	178,5	2,6
<i>Образцы из напечатанного алюминия, сваренного с АМг5</i>			
1	114	217	9
2	73	246	13
Средние значения	93,5	231,5	11

* — значения взяты из справочных данных по [12]

** — значения взяты из справочных данных по [13]

вязкость, соответствующую требованиям стандарта. Сварное соединение напечатанного алюминия и сплава 6082T4 не удовлетворяет требованиям по ударной вязкости. Для этой композиции рекомендуется провести исследование режимов лазерной сварки, обеспечивающей отсутствие дефектов или применение другой технологии сварки, например, — сварка трением с перемешиванием, которая может значительно улучшить механические свойства этого сварного шва.

В результате исследования напряженно-деформированного состояния образцов алюминиевых сплавов и их сварных соединений при растяжении было установлено, что образцы из напечатанного алюминия (без сварки) обладают очень высокой пластичностью, с относительным удлинением при разрыве — 28%, а значит могут быть использованы в защитных конструкциях кабин наравне или взамен принятых сегодня низкоуглеродистых пластичных сталей. Сварное соединение напечатанного алюминия с листовым АМг5 обладает меньшей, по сравнению с основным материалом, пластичностью: относительное удлинение — 11%. В статье [14] приведено численное исследование требований к пластичности сварных соединений в защитных каркасах кабин, выполненных из алюминиевых сплавов, установившее, что относительное удлинение материала алюминиевого сварного шва должно быть на уровне около 5%.

Таким образом, использование высокопластичного алюминиевого сплава АМг5, полученного с помощью аддитивных технологий, позволит создавать защитные конструкции кабин сельскохозяйственной и дорожно-строительной техники из алюминия и тем самым снизить их массу, упростить их производство и эксплуатацию.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Вклад авторов. Д.С. Вдовин — подготовка эксперимента, обработка результатов, сбор и анализ литературных источников, редактирование статьи, постановка задач; Д.А. Александров — проведение эксперимента, обработка результатов, обзор литературы, сбор и анализ

литературных источников, подготовка и написание текста статьи; Н.В. Синюков — подготовка и проведение эксперимента; Д.Н. Рудков — подготовка и проведение эксперимента. Все авторы подтверждают соответствие своего авторства международным критериям *ICMJE* (все авторы внесли существенный вклад в разработку концепции, проведение исследования и подготовку статьи, прочли и одобрили финальную версию перед публикацией).

Конфликт интересов. Авторы декларируют отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с проведенным исследованием и публикацией настоящей статьи.

Источник финансирования. Авторы заявляют об отсутствии внешнего финансирования при проведении исследования.

Благодарности. Авторы выражают благодарность ЛЛМК ФGAOU ВО «СПбПУ» (Россия, Санкт-Петербург) за предоставленные образцы напечатанного алюминия.

ADDITIONAL INFORMATION

Authors' contribution. D.S. Vdovin — conducting experiments, data analysis, collection and analysis of literature sources, editing the manuscript, project management; D.A. Alexandrov — conducting experiments, data analysis, literature analysis, collection and analysis of literature sources, writing and editing the manuscript; N.V. Sinyukov — preparation and conduct of the experiment; D.N. Rudkov — preparation and conduct of the experiment. All authors made a substantial contribution to the conception of the work, acquisition, analysis, interpretation of data for the work, drafting and revising the work, final approval of the version to be published and agree to be accountable for all aspects of the work.

Competing interests. The authors declare that they have no competing interests.

Funding source. This study was not supported by any external sources of funding.

Acknowledgments. The authors are grateful to LLMK FGAOU VO "SPbPU" (Russian Federation, St. Petersburg) for providing the samples of the printed aluminum.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

- ГОСТ ISO 3471-2015. Машины землеройные. Устройства защиты при опрокидывании. Технические требования и лабораторные испытания. М.: Российский институт стандартизации, 2021.
- Вдовин Д.С. Метод топологической оптимизации в задачах проектирования безопасных кабин сельскохозяйственной и строительной техники // Известия МГТУ "МАМИ". 2018. Т. 12, № 4. С. 21–29. doi: 10.17816/2074-0530-66817
- Stahl S., Dietz G., Bischof S., et al. Lightweight Construction of a Multipurpose Vehicle Cabin. In: Engineering, Materials Science, 2019.
- Hydro I.A. More aluminium in agricultural tractor of the future. The aluminium knowledge hub. Дата обращения: 25.03.2024.

Режим доступа: <https://www.shapesbyhydro.com/en/sustainable-design/more-aluminium-in-agricultural-tractor-of-the-future/>

- Naumov A., Isupov F., Rylkov E., et al. Microstructural evolution and mechanical performance of Al-Cu-Li alloy joined by friction stir welding // Journal of Materials Research and Technology. 2020. Vol. 9, N. 6. P. 14454–14466. doi: 10.1016/j.jmrt.2020.10.008
- Ryl'kov E.N., Isupov F.Y., Naumov A.A., et al. Comparative Analysis of the Mechanical Properties of the Friction Stir Welding Joints of Various Aluminum Alloys // Russ. Metall. 2019. 1531–1536. doi: 10.1134/S0036029519130329
- Panchenko O., Kurushkin D., Mushnikov I., et al. A high-performance WAAM process for Al-mg-Mn using controlled

short-circuiting metaltransfer at increased wire feed rate and increased travel speed // *Materials & Design*. 2020. Vol. 195. doi: 10.1016/j.matdes.2020.109040

8. Vdovin D.S., Levenkov Y.Y., Chichekin I.V. Prediction of fatigue life of suspension parts of the semi-trailer in the early stages of design // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2020. Vol. 820, N. 1. doi: 10.1088/1757-899X/820/1/012002

9. Vdovin D.S., Levenkov Y.Y., Chichekin I.V. Light frame design for quad bike using topology optimization // *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2019. Vol. 589, N. 1. doi: 10.1088/1757-899X/589/1/012026

10. ГОСТ 6996-66. Сварные соединения. Методы определения механических свойств. М.: Стандартинформ, 2006.

11. ГОСТ 9454-78. Металлы. Метод испытания на ударный изгиб при пониженных, комнатной и повышенных температурах. М.: ИПК Издательство стандартов, 2002.

12. DIN EN 755-2-2016. Aluminium and aluminium alloys — Extruded rod/bar, tube and profiles — Part 2: Mechanical properties; German version EN 755-2:2016

13. ГОСТ 21631-2019. Листы из алюминия и алюминиевых сплавов. Технические условия. — М.: Стандартинформ, 2020.

14. Левенков Я.Ю., Вдовин Д.С., Александров Д.А. Разработка ROPS из алюминиевых сплавов для фронтальных погрузчиков // *Машины и установки: проектирование, разработка и эксплуатация*. 2023. № 3. С. 1–15.

REFERENCES

1. GOST ISO 3471-2015. Earth-moving machinery. Roll-over protective structures. Technical requirements and laboratory tests. Moscow: Russian Institute of Standardization; 2021. (In Russ.)

2. Vdovin DC. Topology optimization in ROPS-safe design process of operator cabin for forestry, agricultural and construction machinery. *Izvestiya MGTU MAMI*. 2018;12(4):21–29. (In Russ.) doi: 10.17816/2074-0530-66817

3. Stahl S, Dietz G, Bischof S, et al. Lightweight Construction of a Multipurpose Vehicle Cabin In: *Engineering, Materials Science*; 2019.

4. Hydro IA. More aluminium in agricultural tractor of the future. The aluminium knowledge hub. Accessed: 25.03.2024. Available from: <https://www.shapesbyhydro.com/en/sustainable-design/more-aluminium-in-agricultural-tractor-of-the-future/>

5. Naumov A, Isupov F, Rylkov E, et al. Microstructural evolution and mechanical performance of Al-Cu-Li alloy joined by friction stir welding. *Journal of Materials Research and Technology*. 2020;9(6):14454–14466. doi: 10.1016/j.jmrt.2020.10.008

6. Ryl'kov EN, Isupov FY, Naumov AA, et al. Comparative Analysis of the Mechanical Properties of the Friction Stir Welding Joints of Various Aluminum Alloys. *Russ. Metall.* 2019:1531–1536. doi: 10.1134/S0036029519130329

7. Panchenko O, Kurushkin D, Mushnikov I, et al. A high-performance WAAM process for Al-mg-Mn using controlled

short-circuiting metaltransfer at increased wire feed rate and increased travel speed. *Materials & Design*. 2020;195. doi: 10.1016/j.matdes.2020.109040

8. Vdovin DS, Levenkov YY, Chichekin IV. Prediction of fatigue life of suspension parts of the semi-trailer in the early stages of design. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2020;820(1). doi: 10.1088/1757-899X/820/1/012002

9. Vdovin DS, Levenkov YY, Chichekin IV. Light frame design for quad bike using topology optimization. *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 2019;589(1). doi: 10.1088/1757-899X/589/1/012026

10. GOST 6996-66. Welded joints. Methods of mechanical properties determination. Moscow: Standartinform; 2006 (In Russ.).

11. GOST 9454-78. Metals. Method for testing the impact strength at low, room and high temperature. Moscow: Standartinform; 2002 (In Russ.)

12. DIN EN 755-2-2016. Aluminium and aluminium alloys — Extruded rod/bar, tube and profiles — Part 2: Mechanical properties; German version EN 755-2:2016.

13. GOST 21631-2019. Sheets of aluminium and aluminium alloys. Specifications. Moscow: Standartinform; 2020 (In Russ.)

14. Levenkov YaY, Vdovin DS, Aleksandrov DA. Development of aluminum alloy ROPS for front loaders. *Machines and Plants: Design and Exploiting*. 2023;(3):1–15 (In Russ.)

ОБ АВТОРАХ

* **Александров Дмитрий Алексеевич**,
аспирант кафедры СМ-10 «Колёсные машины»;
адрес: Российская Федерация, 105005, Москва,
2-я Бауманская ул., д. 5 стр. 1;
ORCID: 0009-0009-9635-5415;
eLibrary SPIN: 5217-0552;
e-mail: alexandrov.d@bmstu.ru

Вдовин Денис Сергеевич,
канд. техн. наук,
доцент кафедры СМ-10 «Колёсные машины»;
ORCID: 0009-0002-6227-0471;
eLibrary SPIN: 9449-9230;
e-mail: vdovin@bmstu.ru

AUTHORS' INFO

* **Dmitry A. Aleksandrov**,
Postgraduate of the SM-10 Wheeled Vehicles Department;
address: 5 bldg 1, 2nd Baumanskaya street, 105005 Moscow,
Russian Federation;
ORCID: 0009-0009-9635-5415;
eLibrary SPIN: 5217-0552;
e-mail: alexandrov.d@bmstu.ru

Denis S. Vdovin,
Cand. Sci. (Engineering),
Associate Professor of the SM-10 Wheeled Vehicles Department;
ORCID: 0009-0002-6227-0471;
eLibrary SPIN: 9449-9230;
e-mail: vdovin@bmstu.ru

Синюков Никита Владиславович,

заведующий лабораторией кафедры ЛТ-5 «Проектирование объектов лесного комплекса»;

ORCID: 0009-0005-4923-2624;

eLibrary SPIN: 3449-1730;

e-mail: sinukov_nikita@mail.ru

Рудков Дмитрий Николаевич,

заведующий лабораторией кафедры ЛТ-7 «Транспортно-технологические средства и оборудование лесного комплекса»;

ORCID: 0009-0004-8880-5758;

e-mail: Rudkov_dmitri@mail.ru

Nikita V. Sinyukov,

Laboratory Head of the LT-5 Development of Objects of Forestry Industry Department;

ORCID: 0009-0005-4923-2624;

eLibrary SPIN: 3449-1730;

e-mail: sinukov_nikita@mail.ru

Dmitry N. Rudkov,

Laboratory Head of the LT-7 Transport and Technological Means and Equipment of Forestry Industry Department;

ORCID: 0009-0004-8880-5758;

e-mail: Rudkov_dmitri@mail.ru

* Автор, ответственный за переписку / Corresponding author