



Двухуровневая методика оценки эксплуатационной надежности модульной кабины с активной защитой (МКАЗ) от лазерного воздействия

А. Б. Люхтер¹, В. И. Криворотов², К. В. Скворцов³

¹ Владимирский государственный университет имени А. Г. и Н. Г. Столетовых

² ООО НТО «ИРЭ-Полюс»

³ Владимирский юридический институт Федеральной службы исполнения наказаний (ВЮИ ФСИН России)

Выполнение обязательных требований лазерной безопасности, указанных в отечественной и мировой нормативной документации, является важнейшим фактором, определяющим широкое внедрение в промышленное производство лазерных комплексов, установок и систем, а также технологий лазерной обработки. В 2020 году целый ряд нормативных документов РФ утратил правовую силу, в частности СН 5804-91, СанПин 2.2.4.3359-16 и др. Однако важность и актуальность решения проблемы обеспечения условий безопасной эксплуатации лазерного оборудования на отечественных предприятиях, невзирая на отсутствие этих документов в нормативно-правовом поле РФ, не вызывает сомнений. В новых проектах при разработке эксплуатационных документов лазерный генератор без средств коллективной защиты (кабин, кабинетов и др.) по-прежнему продолжают относить к 4-му классу опасности [1–9]. При работе лазерных роботизированных комплексов (ЛРК) не исключена вероятность возникновения опасных и аварийных ситуаций: образование мощного отраженного лазерного излучения (ЛИ)

Two-Level Method for Assessing The Operational Reliability of a Laser Impact Active-Protection Modular Cabin (APMC)

A. B. Lyukhter¹, V. I. Krivorotov², K. V. Skvortsov³

¹ Vladimir State University named after

A. G. and N. G. Stoletovs (VLSU), Vladimir, Russia

² NTO «IRE-Polyus: LLC, Fryazino, Moscow region, Russia

³ Vladimir Law Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia (VLI of FPS of Russia), Vladimir, Russia

The results of a comprehensive assessment of the operational reliability of a laser impact active-protection modular cabin (APMC) are presented. A two-level computational and experimental technique has been developed and practically implemented, which includes, at the first level, the determination of the «actuation» time of the laser radiation emergency shutdown system (LRESS) under the conditions³ of APMC with a continuous fiber laser generator operating with a maximum power of 6 kW. At the second level, the stress and structural state of the metal of the panels was assessed, as well as the bearing capacity of the APMC elements after repeated laser impact. The reliability and advantages of APMC in terms of equipping with LRESS protection means, excluding the possibility of laser radiation leaving the cabin, are shown.

Keywords: laser technological equipment; active-protection modular cabins (APMC); laser radiation emergency shutdown system (LRESS); fiber-optic laser generator with a power of 6 kW; protection against direct, reflected and scattered radiation of laser impact; magnetometric stress state control; bearing capacity; reliability of APMC elements.

Received on: 04.06.2021

Accepted on: 20.08.2021

Fulfillment of the mandatory requirements for laser safety specified in domestic and world regulatory doc-



от обрабатываемой поверхности; выход ЛИ за пределы обрабатываемой детали / области обработки в сторону вероятного нахождения персонала (прожиг обрабатываемой детали, неточность позиционирования, сбой программы управления). При возникновении аварийных ситуаций высока вероятность нанесения тяжелого вреда здоровью рабочего персонала лазерным излучением. По мнению авторов настоящей работы, ссылаясь на собственный опыт, а также публикации других исследователей [5–7, 10–13], лазерный генератор, используемый в составе лазерных систем (установок, комплексов и др.), оборудованный средствами коллективной активной защиты, можно с достаточным обоснованием отнести к 1-му классу опасности.

Статья получена: 04.06.2021
Статья принята: 20.08.2021

Целью настоящей работы является отработка и применение двухуровневой методики оценки эксплуатационной надежности модульной кабины с активной защитой (МКАЗ) от несанкционированного лазерного воздействия при выполнении ее функциональных свойств.

В работе представлены результаты испытаний разработанной модульной защитной кабины, оснащенной системой аварийного отключения лазерного излучения (САОЛИ). МКАЗ создана в качестве средства коллективной защиты [8] от несанкционированного воздействия ЛИ при размещении в ее пространстве лазерных технологических комплексов для различных технологических процессов лазерной обработки (сварки, наплавки, упрочнения и др.). По оснащенности средствами защиты МКАЗ обладает несомненными преимуществами по сравнению с защитными кабинами пассивного исполнения (без активной защиты).

Суть специально разработанной расчетно-экспериментальной двухуровневой методики оценки эксплуатационной надежности МКАЗ состоит в следующем. На первом уровне методики проводятся испытания на эффективность работы САОЛИ генератора непрерывного лазерного излучения максимальной мощностью 6 кВт.

На втором уровне проводилось исследование результата воздействия ЛИ на структурные и физико-механические характеристики металлических панелей, напряженное состояние, а также эксплуатационные свойства элементов МКАЗ,

uments is the most important factor determining the widespread introduction into industrial production of laser complexes, installations and systems, as well as laser processing technologies. In 2020, a number of regulatory documents of the Russian Federation, such as SN 5804-91, SanPiN 2.2.4.3359-16, etc. are losted a legal force.

However, the importance and relevance of solving the problem of ensuring the conditions for the safe operation of laser equipment at domestic enterprises, despite the absence of these documents in the legal framework of the Russian Federation, is beyond doubt. In new projects, when developing operational documents, a laser generator without collective protection equipment (cabins, posts, etc.) is still classified as hazard class 4 [1-9]. However, during the operation of laser robotic systems (LRS), the likelihood of hazardous and emergency situations is not excluded: due the formation of powerful reflected laser radiation (LR) from the treated surface; LR going beyond the limits of the workpiece or processing area in the direction of the likely presence of personnel (burn-in of the workpiece, inaccurate positioning, failure of the control program).

In the event of an emergency, there is a high likelihood of serious harm to the health of working personnel by laser radiation. In the opinion of the authors of this work, referring to their own experience, as well as publications of other researchers [5-7, 10-13], a laser generator used as part of laser systems (installations, complexes, etc.), equipped with means of collective active protection, can be with sufficient justification to refer to the 1st hazard class.

The purpose of this work is to develop and apply a two-level methodology for assessing the operational reliability of an active-protection modular cabin (APMC) from unauthorized laser impact while fulfilling its functional properties.

The paper presents the test results of the developed modular protective cabin equipped with a laser radiation emergency shutdown system (LRESS). APMC was created as a means of collective protection [8] from unauthorized influence of LR when placing laser technological complexes in its space for various technological processes of laser processing (welding, surfacing, hardening, etc.). In terms of equipping with protection means, APMC has undoubted advantages over passive protective cabins (without active protection).

The essence of a specially developed design and experimental two-level methodology for assessing the operational reliability of APMC is as follows. At the first level of the technique, tests are carried out for the

то есть проводилась оценка правомерности заложенных при проектировании и изготовлении кабины конструктивных технических решений.

Основные положения принципа работы САОЛИ состоят в формировании аварийного сигнала отключения источника лазерного излучения для предотвращения распространения ЛИ за пределы МКАЗ. Данная задача решается посредством расположения чувствительного элемента датчика в пространстве между стенками панели (рис. 1). При попадании прямого лазерного излучения на переднюю стенку панели происходит ее разогрев с последующим прожигом. Прямое, отраженное или диффузно-рассеянное (переотраженное) лазерное излучение, спектр которого попадает в диапазон чувствительности применяемого фотодиода, прошедшее в результате прожига во внутреннюю полость панели МКАЗ, регистрируется модулем САОЛИ. Схема управления фильтрует и усиливает фототок, а затем формирует релейный сигнал для цепей безопасности лазерной установки.

Таким образом, САОЛИ обеспечивает на лазерном оборудовании 4-го класса опасности формирование аварийного сигнала отключения источника лазерного излучения, исключающего его распространение за пределы кабины. Соответственно лазерный технологический комплекс (ЛТК), имеющий подобную надежную каabinную защиту от выхода луча за пределы корпуса, можно отнести под определение лазерных изделий 1-го класса опасности.

Испытания эффективности проводили по программе, регламентирующей порядок проведения испытаний в соответствии с выбранными режимами эксперимента. На первом уровне методики экспериментально определялась надежность системы САОЛИ на МКАЗ оборудования для лазерной наплавки. Эффективность экстренного автоматического отключения лазерного излучения определяли при работающем лазерном генераторе непрерывного действия максимальной мощностью 6 кВт с волоконной оптической системой и фокусным расстоянием 250 мм.

Методика первого уровня предписывала проведение операций в следующей последовательности с учетом выбранного положительного результата испытания – отсутствия сквозного отверстия в задней стенке панели МКАЗ:

- провести воздействие ЛИ на поверхность передней стенки панели в зону, определенную случайным образом до срабатывания САОЛИ, отключающим генератор ЛИ;

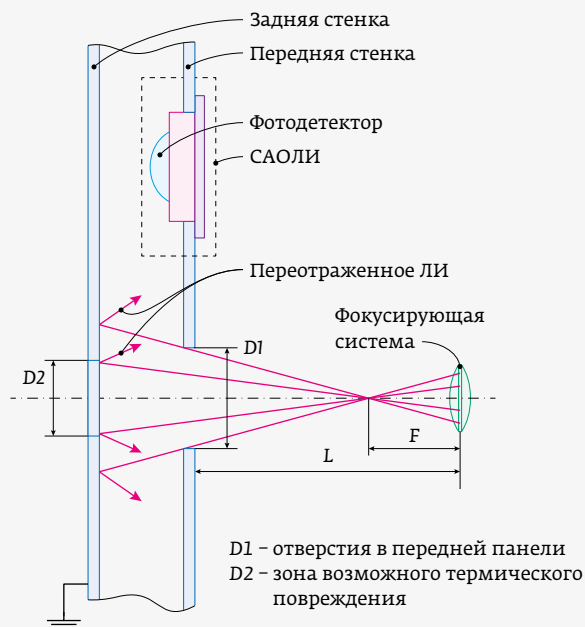


Рис. 1. Общая схема САОЛИ в стенке панели МКАЗ (источник [18])

Fig. 1. General scheme of LRESS in the panel side of a active-protection modular cabin (APMC) (source [18])

efficiency of the LRESS generator of continuous laser radiation with a maximum power of 6 kW.

At the second level, the study of the effect of LR on the structural and physical-mechanical characteristics of metal panels, the stress state, as well as the operational properties of APMC elements was carried out. That is, the assessment of the correctness of the structural solutions laid down in the design and implemented in the manufacture of the cabin was carried out.

The main provisions of the LRESS principle of operation are to generate an alarm signal for switching off the laser radiation source to prevent spread of LR outside the APMC. This solution is performed by placing the sensor's sensitive element in the space between the sides of the double-sided panel (Fig. 1). When direct laser radiation hits the front side of the panel, it heats up with subsequent burning. Direct, reflected or diffusely scattered (re-reflected) laser radiation, the spectrum of which falls within the sensitivity range of the applied photodiode, passed as a result of burning into the inner cavity of the APMC panel, is recognized by the LRESS module. The control circuit filters and amplifies the photocurrent, and then generates a relay signal for the safety circuits of the laser complex.



Таблица 1. Режимы и показатели воздействия лазерного излучения на панели МКАЗ

Table 1. Modes and indicators of impact to laser radiation on the APMC panel

Уровень методики Method level	Мощность ЛИ, кВт LR power, kW	Расстояние от оптической головки до панели (L) Distance from optical head to panel (L)	Показатели воздействия лазерного излучения на панель МКАЗ** Indicators of the impact of laser radiation on the APMC panel **		
			Эффективность срабатывания САОЛИ LRESS activation efficiency	Передняя стенка Front side	Задняя стенка Rear side
Первый First	5	*F	100%	Прожег Burn through	Следов воздействия не обнаружено Impact traces not detected
		3F			
		5F			
Второй Second		3F	САОЛИ отключена LRESS deactivated	Прожег Burn through	Нагрев, вспучивание краски, прожег Heating, swelling of paint, burn through
		5F			

* F=250 мм | F= 250 mm

** По результатам не менее 5 повторений на каждом расстоянии | Based on the results of at least 5 repetitions at each distance

- провести визуальный осмотр задней стенки панели на наличие сквозного отверстия;
- при обнаружении на поверхности задней стенки панели (выгорания краски, подплавления металла и др.) необходимо провести изучение данной зоны с помощью дополнительных оптических приборов на предмет установления результатов влияния термического воздействия ЛИ на материал задней стенки.

Согласно методике испытаний диапазон расстояний от панели до оптической головки ЛТК (L) равнялся одному (F), трем (3F) и пяти (5F) фокусным расстояниям оптической системы. Испытание на каждом из расстояний повторялся не менее пяти раз. Режимы и результат воздействия лазерного излучения на панели МКАЗ представлены в табл. 1. Изображения панелей после испытаний представлены на рис. 2.

В результате тщательного осмотра задней стенки панели МКАЗ не выявлено сквозных отверстий и следов теплового воздействия, что является свидетельством того, что лазерное излучение не выходило за ее пределы. Исключением являлся прожег передней и задней панелей с отключенной САОЛИ (рис. 2 а).

В ходе проведенных испытаний установлено, что САОЛИ, с очень высокой степенью вероятности, выполняет аварийное отключение лазерного генератора от сетевого питания, что обеспечивает высокую эффективность активной защиты на серийных комплексах лазерной обработки с МКАЗ.

Thus, LRESS provides on laser equipment of the 4-th hazard class the formation of an emergency signal for switching off the source of laser radiation, which excludes its propagation outside the cabin. Accordingly, a laser technological complex (LTC) with such a reliable protection from the beam going out of the cabin can be classified under the definition of laser products of the 1st hazard class.

Efficiency tests were carried out according to the program regulating the test procedure in accordance with the selected experimental modes. At the first level of the methodology, the reliability of the LRESS system at APMC for laser cladding equipment was experimentally determined. The error-proof of the emergency automatic shutdown of laser radiation was determined with an operating continuous laser generator with a maximum power of 6 kW with a fiber optic system and a focal length of 250 mm.

The method of the first level prescribed operations in the following sequence, taking into account the selected positive test result – the absence of a through hole in the rear side of the APMC panel:

- to impact with LR on the surface of the front side of the panel in the zone, determined randomly before the operation of the LRESS, which turns off the LR generator;
- carry out a visual inspection of the rear side of the panel for the presence of a through hole; if it is detected on the surface of the rear side of the panel (paint burnout, metal melting, etc.), it is necessary to study this zone with the help of additional optical devices in order to establish the results of the

Известно, что для незащищенных средствами индивидуальной защиты органов зрения и участков кожи, большую опасность может представлять отраженное и диффузно рассеянное лазерное излучение [9–13]. Эти виды излучений способны проникать за пределы защитной кабины через зазоры, щели между стойками, панелями и др. ее элементами, что существенно снижает уровень защитных свойств кабины.

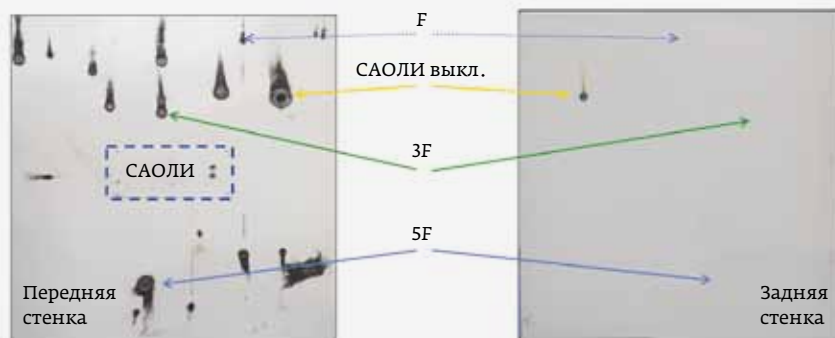
Поэтому на втором уровне методики проводили исследование особенностей воздействия лазерного излучения (прямого и отраженного) и оценку степени влияния тепловых эффектов от прямого лазерного излучения на напряженное состояние конструктивных элементов и металлоконструкции МКАЗ в целом на протяжении заданного расчетного времени ее эксплуатации. Прежде всего для определения показателей напряженного состояния с целью исключить воздействие механических и тепловых факторов, вызывающих возникновение остаточных дефор-

effect of the thermal effect of LR on the material of the rear side.

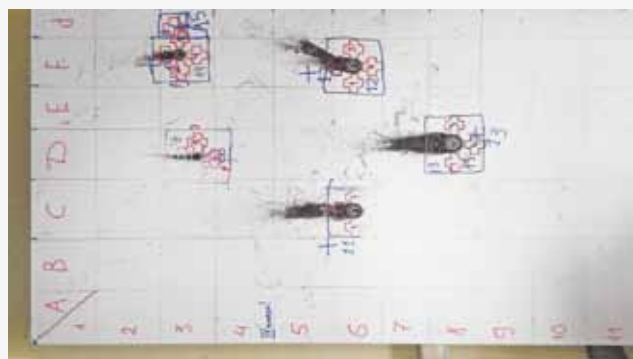
According to the test methodology, the range of distances from the panel to the optical head of LTC (L) was equal to one (F), three (3F) and five (5F) focal lengths of the optical system. The test at each distance was repeated at least 5 times. Modes and results of impact to laser radiation on the APMC panel are presented in table. 1. Images of panels after testing are shown in Fig. 2.

As a result of a thorough visual inspection of the rear side of the APMC panel, no through holes and traces of heat impact were found, which is evidence that the laser radiation did not go beyond its limits. An exception was the burn-through of the front and rear sides with the LRESS was disabled (Fig. 2a).

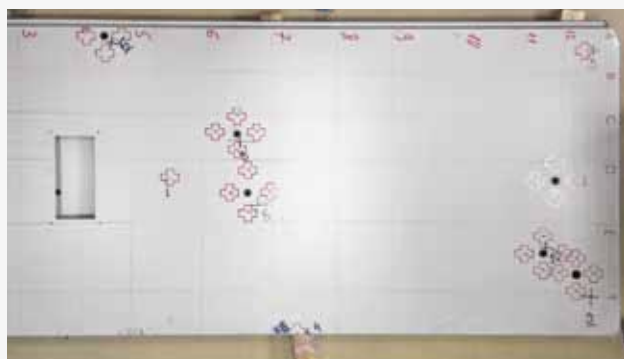
During the tests carried out, it was found that LRESS, with a very high degree of probability, performs an emergency shutdown of the laser generator from the mains supply, which ensures high efficiency



а)



б)



в)

Рис. 2. Внешний вид панелей МКАЗ после проведения испытаний: а) в соответствии с первым уровнем методики; передняя стенка (б) и задняя стенка (в) после проведения испытаний в соответствии со вторым уровнем методики
Fig. 2. Appearance of the APMC panels after testing: а) according to the first level of the methodology; the front side (б) and the rear side (в) after testing in accordance with the second level of the methodology



Таблица 2. Результаты определения химического состава образцов панели

Table 2. Results of determining the chemical composition of panel samples

№ обр. Sample No.	Содержание элементов, % по массе Content of elements, % by weight								
	C	Si	Mn	Cr	Ni	Cu	Al	S	P
1-5	0,044 0,080	0,008 0,013	0,283 0,301	0,013 0,014	0,012 0,017	0,024 0,026	0,045 0,049	0,008	0,008
Среднее Average	0,07	0,012	0,289	0,014	0,015	0,025	0,046	0,008	0,008
Сталь 08Ю Steel 08Yu	<0,07	<0,03	<0,03	-	-	-	0,02-0,07	<0,025	<0,02

Примечание: 1. В таблице представлены средние данные 3-5 измерений. В числителе указаны минимальные значения, в знаменателе – максимальные.

2. Химический состав образцов соответствует стали 08Ю (ГОСТ 9045).

Note: 1. The table shows average data of 3-5 measurements. The numerator indicates the minimum values, the denominator – the maximum ones.

2. The chemical composition of the samples corresponds to steel 08Yu (GOST 9045).

маций в виде «поводок», «коробления» и др. макро- и микрогабаритных искажений и несовершенств, снижающих эффективность защитных (эксплуатационных) свойств отдельных сборочных элементов и кабины в целом. Увеличение напряжений в металлоконструкции панелей кабины способствует возникновению искажений формы и потери размеров, образованию зазоров, щелей и др. несовершенств, что недопустимо. Известно, что между химическим составом ферромагнитных материалов и значением их коэрцитивной силы H_c существует достаточно устойчивая взаимосвязь [14]. Чтобы установить эту зависимость для материала исследуемых панелей МКАЗ, отбирали образцы

(5 шт.) и определяли химический состав металла оптическим методом на анализаторе Magellan Q-8. Результаты определения химического состава образцов панелей представлены в табл. 2.

По результатам определения химического состава металла панелей с использованием формул, предложенных Н. Д. Богачевой [14], выполняли предварительные расчеты теоретического среднего значения коэрцитивной силы (H_c). При расчетах использовали среднее количественное содержание элементов (C, Si, Mn, Cr и Ni) в стали. Результаты расче-

тов активной защиты при серийной лазерной обработке комплексов с АРМС.

Известно, что отраженная и диффузно рассеянная лазерная радиация может представлять большую опасность для органов зрения и кожи, не защищенных средствами индивидуальной защиты [9-13]. Эти типы радиации способны проникать за пределы защитной кабины через зазоры, щели между панелями, другими элементами, что значительно снижает уровень защитных свойств кабины.

Поэтому, на втором уровне методологии, исследование особенностей эффекта лазерной радиации (прямой и отраженной) было проведено и проведено оценивание степени влияния тепловой

Таблица 3. Расчетные значения H_c по данным химического состава стали 08Ю

Table 3. Calculated values of H_c according to the chemical composition of 08Yu steel

№ Образцов 1...5 Samples 1-5	Содержание элементов, % по массе Content of elements, % by weight (El%)				
	C	Si	Mn	Cr	Ni
Среднее Average	0,07	0,012	0,289	0,014	0,015
Коэффициенты*, К Coefficients*, K	16	2	0,9	0,6	3
Значение H_c для каждого элемента получено по формуле: $H_c = K \cdot El\%$ The H_c value for each element is obtained by the formula: $H_c = K \cdot El\%$					
Коэрцитивная сила H_c , А/см Coercive force H_c , A/cm	1,12	0,024	0,26	0,0084	0,045
	Сумма: 1,46 ≈ 1,5 Total: 1,46 ≈ 1,5				

* По данным автора работы [14]

* According to the author of work [14]



тов, выполненных по формуле (1), представлены в табл. 3.

$$H_c = K_C \cdot C\% + K_{Si} \cdot Si\% + K_{Mn} \cdot Mn\% + K_{Cr} \cdot Cr\% + K_{Ni} \cdot Ni\%. \quad (1)$$

В формуле (1): K_C , K_{Si} , K_{Mn} , K_{Cr} , K_{Ni} – эмпирические коэффициенты (таблица 3) перед содержанием в стали соответствующих элементов (в %).

$$H_c = (16 \cdot 0,07) + (2 \cdot 0,012) + (0,9 \cdot 0,289) + (0,6 \cdot 0,014) + (3 \cdot 0,015)$$

$$1,12 + 0,024 + 0,26 = 1,46 \approx 1,5 \text{ А/см.}$$

То есть ориентировочное среднее (ожидаемое) значение H_c исследуемого металлопроката в пределах марочного состава стали 08Ю в исходном состоянии составляет $H_c = 1,5 \text{ А/см}$ (табл. 3).

Полученное расчетное значение H_c использовали в качестве достоверного первичного информационного параметра, в том числе для последующей оценки напряженного состояния.

Для определения механических свойств и напряженного состояния элементов и МКАЗ в целом использовали современные методы неразрушающего магнитометрического контроля, металлографического и структурного анализа, статистической обработки данных, совместно с механическими испытаниями, измерением твердости и др.

Панель МКАЗ (внутреннюю и наружную стороны) условно разделяли на участки по степени воздействия лазерного излучения и соответствующе маркировали (рис. 2б, в). Чтобы исключить распространение диффузорассеянного лазерного излучения внутрь панели через образованные прожогом отверстия, их, перед каждым последующим включением лазера, закрывали (заглушали) непрозрачным скотчем. Таким образом, повышали достоверность определения облученности при экспериментах.

По окончании экспериментов по оценке эффективности срабатывания САОЛИ проводили измерение значений H_c на внутренней (со стороны нахождения датчика) и наружной стороне панели на заранее размеченных участках (рис. 2б, в). После измерений H_c из панели отбирали образцы для дальнейших исследований металлографической структуры, а также напряженного состояния металла панелей МКАЗ.

Макроструктурный металлографический анализ выполняли на шлифах, изготовленных из темплет, отобранных из характерных участков панели после лазерного облучения с различной

effects from direct laser radiation on the stressed state of structural elements and metal structures of APMC as a whole over a given estimated time of its operation. First of all, to determine the stress state indicators in order to exclude the effect of mechanical and thermal factors that cause the occurrence of residual deformations in the form of shape distortion « and other macro- and micro-dimensional distortions and imperfections that reduce the effectiveness of the protective (operational) properties of individual assembly elements and the cabin as a whole.

An increase in stresses in the metal structure of the cabin panels contributes to the appearance of shape distortions and loss of dimensions, the formation of gaps, cracks and other imperfections, which is unacceptable. It is known that there is a fairly stable relationship between the chemical composition of ferromagnetic materials and the value of their coercive force H_c [14]. To establish this dependence for the material of the studied APMC panels, were taken 5 samples and the chemical composition of the metal was determined by the optical emission method on a **Magellan Q-8 analyzer**. The results of determining the chemical composition of the panel samples are presented in table. 2.

Based on the results of determining the chemical composition of the metal of the panels using the formulas proposed by N. D. Bogacheva [14] performed preliminary calculations of the theoretical mean value of the coercive force (H_c). The calculations used the average quantitative content of elements (C, Si, Mn, Cr and Ni) in steel. The results of calculations performed according to the formula (1) are presented in table 3.

$$H_c = K_C \cdot C\% + K_{Si} \cdot Si\% + K_{Mn} \cdot Mn\% + K_{Cr} \cdot Cr\% + K_{Ni} \cdot Ni\%. \quad (1)$$

In formula (1): are the empirical coefficients (Table 3) before the content of the corresponding elements in steel (in%).

$$H_c = (16 \cdot 0,07) + (2 \cdot 0,012) + (0,9 \cdot 0,289) + (0,6 \cdot 0,014) + (3 \cdot 0,015)$$

$$1,12 + 0,024 + 0,26 = 1,46 \approx 1,5 \text{ А/см.}$$

That is, the approximate average (expected) value of H_c of the investigated rolled metal products within the grade composition of steel 08Yu in the initial state is $H_c = 1,5 \text{ А/см}$ (Table 3).

The resulting calculated value of H_c was used as a reliable primary information parameter, including for the subsequent assessment of the stress state sides of the panel.

мощностью, фокусным расстоянием и продолжительностью (длительностью воздействия), а также после измерения значений H_c металла панели. Общий вид отдельных макрошлифов и панорама зоны теплового воздействия лазерного излучения с характерным типом макро- и микроструктур представлен на рис. 3. На рис. 3а видны следы (участки темного цвета), характеризующие последствия теплового (термического) воздействия прямого лазерного излучения на исследуемую стенку панели.

Это вызывает пережог границ зерен (рис. 3б) и в конечном итоге прожог всей толщины панели кабины (рис. 3с). Хорошо заметны характерные отдельные области с видимыми структурными искажениями (пережогом) границ зерен, а также вполне различимы близко расположенные участки самих зерен, вызванные воздействием лазерного излучения. Следует отметить, что, по мере приближения к зонам оплавления (около прожога) или непосредственно вблизи сквозного прожога исследуемой панели, результаты проявления этих воздействий на структурные изменения заметно усиливаются. Это выражается прежде всего тем, что сами границы зерен искажены «пережогом» и, как следствие, потерей механической прочности металла (рис. 3 б; с).

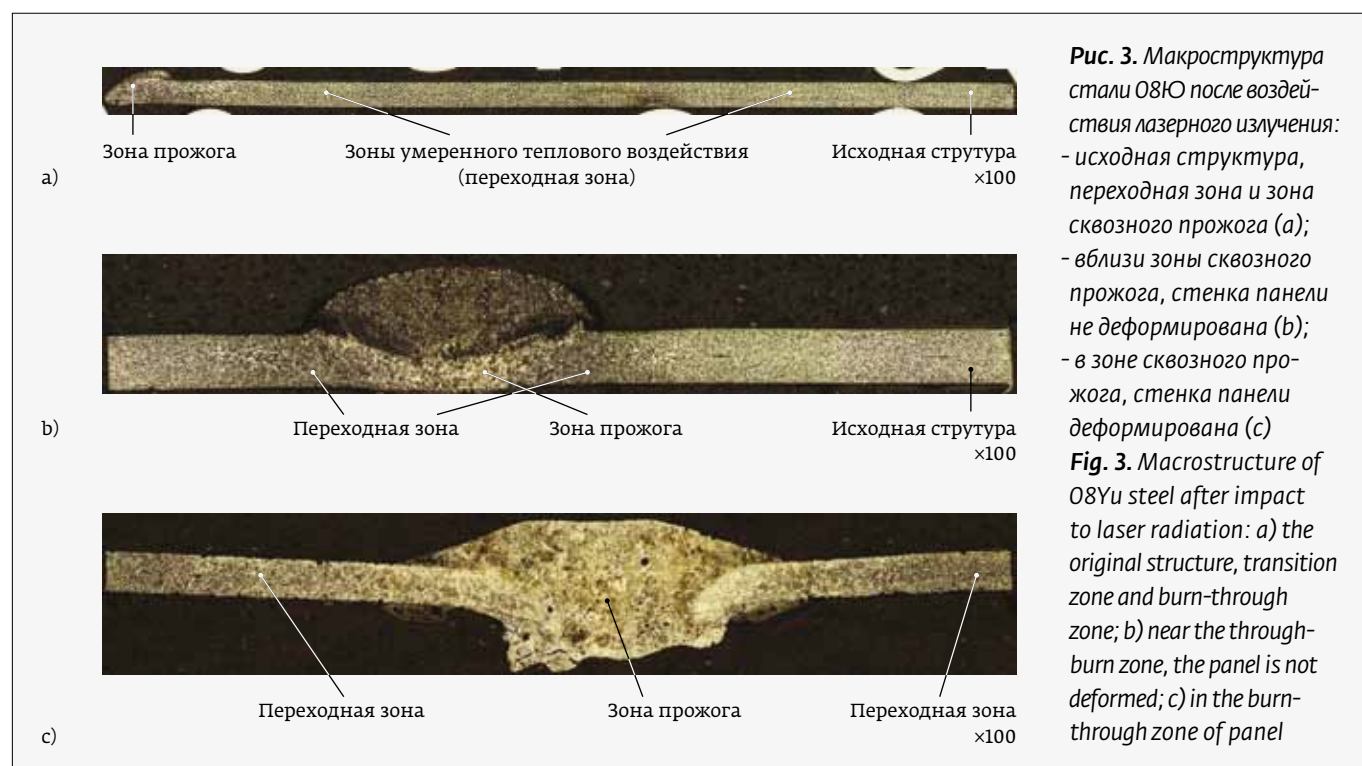
Микроструктурный анализ, чтобы повысить достоверность результатов и обеспечить иденти-

To determine the mechanical properties and stress state of elements and APMC as a whole, modern methods of non-destructive magnetometric testing, metallographic and structural analysis, statistical data processing, together with mechanical tests, hardness measurements, etc. were used.

The APMC panel (front and rear sides) was conventionally divided into sections according to the degree of impact to laser radiation and marked accordingly (Fig. 2b, c). To exclude the propagation of diffusely scattered laser radiation inside the panel through the holes formed by the burn-through, they were covered (muffled) with an opaque tape before each subsequent switching on of the laser. Thus, the reliability of the determination of the irradiance in the experiments was increased.

At the end of the experiments on the first level of the methodology – assessing the efficiency of the LRESS actuation, the H_c values were measured on the front side (from the side where the sensor was located) and rear side outer sides of the panel at pre-marked areas (Fig. 2b, c). After H_c measurements, samples were taken from the panel for further studies of the metallographic structure, as well as the stress state of the metal of the APMC panels.

As a result of investigations, it was found that LRESS, with a high degree of reliability, performs an emergency disconnection of the laser generator from the mains supply for a specified minimum period of



кацию образцов, взятых от стенки панели, проводили на микрошлифах, полученных из темплет, которые использовали для изготовления макрошлифов. Подготовку микрошлифов (запрессовку, шлифование, полировку и др.) осуществляли на комплексе оборудования фирмы Struers (Дания). Травление микрошлифов осуществляли в 20% - ом спиртовом растворе азотной кислоты. Микроструктура стали 08Ю до и после воздействия лазерного излучения (ЛИ) представлена на рис. 4. Размер зерна определяли с помощью микроскопа OlympusGX51 (Япония). Измерение величины зерна проводили с использованием специальной программы SIAMSD, а также методом секущей при двухсоткратном увеличении изображения [23, 24].

Микроструктура стали 08Ю до (а) и после (б) воздействия лазерного излучения представлена на рис. 4. Из рис. 4а следует, что в исходном (до воздействия ЛИ) состоянии структура металла панели характерна для сталей типа 08Ю в нормализованном состоянии.

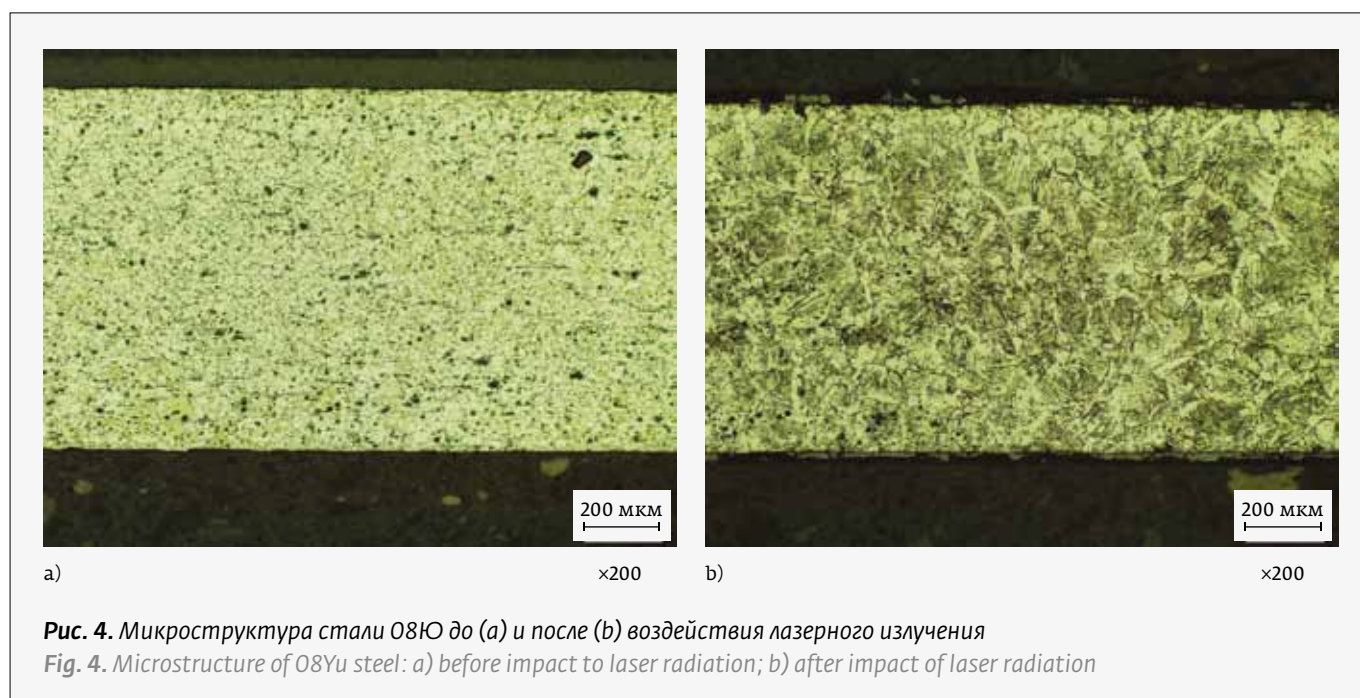
Средний размер зерна равен 0,013 мм (13 мкм). В зоне воздействия прямого лазерного излучения на участках, расположенных в непосредственной близости от сквозных отверстий, образованных в результате прожога исследуемой панели, микроструктура имеет характерный вид термически обработанного металлического материала. Заметно увеличение размера зерна на этих участках, в среднем, от 0,013 мм (13 мкм) с наличием отдельных фрагментов с до 0,1 мм (100 мкм) (рис. 4б).

time and ensures the effectiveness of the APMC application on serial laser processing complexes.

MACROSTRUCTURAL METALLOGRAPHIC ANALYSIS

Macrostructural metallographic analysis was performed on thin sections made from specially selected templates. Templates were selected from the characteristic sections of the panel after their irradiation with a laser instrument with variable parameters: different power, focal length of the laser head and duration (duration) of impact; and also after measuring the Hc values of the panel metal. A general view of individual macrosections and a panorama of the zone of thermal effect of laser radiation with a characteristic type of macro- and microstructures is shown in Fig. 3. In fig. 3a shows traces (dark areas) characterizing the consequences of thermal effect of direct laser radiation on the panel side under study.

This causes the grain boundaries to burn through (Fig. 3b) and ultimately burns through the entire thickness of the cab panel (Figure 3c). The characteristic separate areas with visible structural distortions (overburning) of the grain boundaries are clearly visible, as well as the closely spaced areas of the grains themselves, caused by the action of laser radiation, are quite distinguishable. It should be noted that as one approaches the reflow zones (near the burn-through) or directly near the through-burn-through of the panel under study, the results of the manifestation of these effects on structural changes noticeably



Параллельно с металлографическими исследованиями структуры в зонах теплового воздействия лазерного излучения, на микрошлифах определяли микротвердость металла кабины [25, 26]. Микротвердость определяли при помощи микротвердомера DuraScan 20 (EmcoTest - Австрия) при нагрузке 100 грамм. Микротвердость на исследуемых участках панели в исходном (до теплового воздействия ЛИ) состоянии составляла в среднем $HV_{0,1}=100$. Микротвердость на участках, подвергшихся воздействию лазерного излучения, в зависимости от близости к зоне сквозного прожога, значительно выше (в 1,3–1,9 раз) и составляла $HV_{0,1}=130-190$. Это свидетельствует также об увеличении напряжений в металле панели после лазерного воздействия [27–30]. График распределения микротвердости по длине образца (рис. 5а) в зависимости от места расположения от сквозного отверстия (прожога) на исследуемой панели и структура образца представлены на рис. 5б.

Из графика (рис. 5а) следует, что от воздействия прямого лазерного излучения средние значения микротвердости металла с приближением в сквозное отверстие, образованному в результате прожога панели, повышаются.

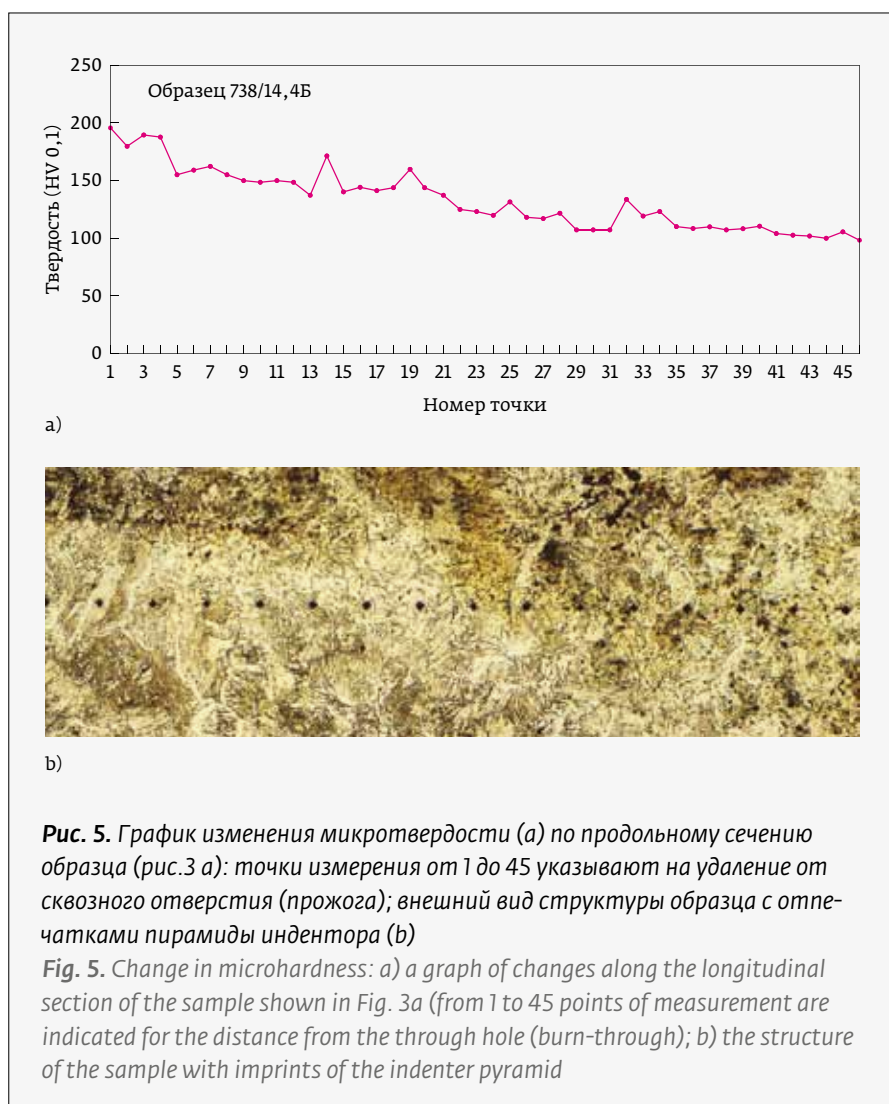
Увеличивается также неравномерность распределения значений микротвердости по сечению, имеются отдельные участки с видимыми структурными искажениями, вызванными термическим воздействием (пережогом) границ зерен. По неравномерности распределения значений микротвердости на измеренных участках, соответствующих исходной структуре, переходной зоне и зоне сквозного прожога, можно судить о неоднородности напряженного состояния на этих участках.

С учетом рекомендаций авторов работ [31, 32] выполняли построение полей теплового (термического) воздействия на металл панели в данных экспериментах. На схеме (рис. 6) представлено изображение полей изотерм, характеризующих

increase. This is expressed, first of all, by the fact that the grain boundaries themselves are distorted by «overburning» and, as a consequence, the loss of the mechanical strength of the metal (Fig. 3b, c).

MICROSTRUCTURAL ANALYSIS

To increase the reliability of the results and ensure the identification of samples taken from the panel side, microstructural analysis was performed on specially selected microsections. Microsections were obtained from those templates that were used to make macrosections. The preparation of microsections (pressing, grinding, polishing, etc.) was carried out using a set of equipment of the company «Struers», Denmark. The etching of microsections was carried out in a 20% alcohol solution of nitric acid. The microstructure of 08Yu steel before and after impact to laser radiation (LR) is shown in Fig. 4. The grain size was determined using a microscope GX51 (Olympus, Japan). The mea-



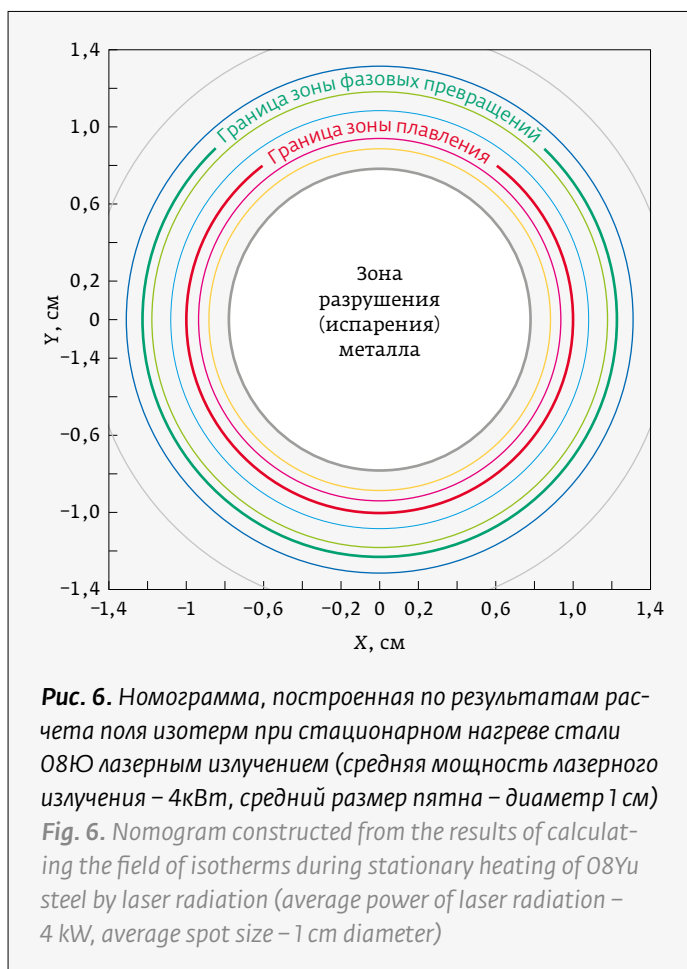


Рис. 6. Номограмма, построенная по результатам расчета поля изотерм при стационарном нагреве стали 08Ю лазерным излучением (средняя мощность лазерного излучения – 4кВт, средний размер пятна – диаметр 1 см)
Fig. 6. Nomogram constructed from the results of calculating the field of isotherms during stationary heating of 08Yu steel by laser radiation (average power of laser radiation – 4 kW, average spot size – 1 cm diameter)

ющих типичное тепловое воздействие лазерного излучения при стационарном нагреве. Из результатов расчетно-экспериментальных исследований следует, что напряжения от теплового (термического) воздействия лазерного излучения не превосходят значение предела прочности металла панелей МКАЗ (стали 08Ю). Это не допускает возникновение критических деформаций от теплового воздействия лазерного излучения, способных привести к искажению (поводкам) формы панели, вызывающих неплотное прилегание панелей к элементам каркаса кабины. И, следовательно, практически исключает возможность распространения через щели, зазоры и др. несплошности между панелями и стойками (элементами) каркаса отраженного и диффузорассеянного лазерного излучения за пределы кабины.

Полученную номограмму (рис. 6) использовали для изучения особенностей теплового воздействия лазерного излучения на конструктивные элементы панели защитной кабины. Данные номограммы учитывали при отборе проб и вырезке из характерных участков панели образцов, для изготовления

surement of the grain size was carried out using a special PC program SIAMSA, as well as by the secant method at a two-hundredfold magnification of the image [23, 24].

The microstructure of 08Yu steel before (a) and after (b) impact to laser radiation is shown in Fig. 4. It follows from Fig. 4a that in the initial (before impact to LR) state, the structure of the panel metal is characteristic of steels type 08Yu in a normalized state.

The average grain size is 0.013 mm (13 μm). In the area of impact to direct laser radiation, in the areas located in the immediate vicinity of the through holes formed as a result of burn-through of the panel under study, the microstructure has a characteristic appearance of a heat-treated metal material. There is a noticeable increase in grain size in these areas, on average, from 0.013 mm (13 μm) with the presence of individual fragments from to 0.1 mm (100 μm) (Fig. 4b).

In parallel with metallographic studies of the structure in the zones of thermal effect of laser radiation, the microhardness of the metal of the cabin sides was determined on microhardness [25, 26]. The microhardness was determined using a DuraScan 20 microhardness tester (Emco Test, Austria) at a load of 100 grams. The microhardness in the studied areas of the panel in the initial (before the thermal effect of LR) state was, on average, HV0.1=100. The microhardness in the areas exposed to laser radiation, depending on the proximity to the through-burn zone, is much higher (1.9 times) and amounted to HV0.1=130...190. This also indicates an increase in stresses in the panel metal after laser impact [27–30]. The graph of the distribution of microhardness along the length of the sample (Fig. 5a) depending on the location from the through hole (burn-through) on the panel under investigations and the structure of the sample are shown in Fig. 5b. It follows from the graph (Fig. 5a) that the average values of the microhardness of the metal increase with the approach in the through hole formed as a result of the panel burn-through due to impact to direct laser radiation.

The uneven distribution of microhardness values over the section also increases, there are separate areas with visible structural distortions caused by thermal effects (overburning) of grain boundaries. By the uneven distribution of microhardness values in the measured areas corresponding to the original structure, the transition zone and the through-burn zone, one can judge the inhomogeneity of the stress state in these areas.

Taking into account the recommendations of the authors of works [31, 32], the fields of thermal impact

макро- и микрошлифов и последующего металлографического исследования, определения твердости, а также проведения механических испытаний.

Для определения физико-механических свойств металлопроката и уровня напряжений на отдельных участках и кабины в целом использовали специальную методику магнитометрического контроля, основанную на измерении коэрцитивной силы металла, поскольку и между химическим составом ферромагнитного материала, его механическими свойствами, структурным, напряженным состоянием и коэрцитивной силой также существует достаточно устойчивая взаимосвязь [19–22]. В свою очередь, и механические свойства в значительной мере определяются химическим составом материала, его состоянием после термомеханического воздействия (например прокатки,ковки и др. и видов термообработки: закалки, нормализации, улучшения, отжига и др.). Это позволяет провести предварительные расчеты H_c и использовать их в дальнейшем при оценке напряженного состояния элементов, панелей и в целом МКАЗ.

Измерения значений коэрцитивной силы выполняли с помощью коэрцитиметра (магнитного структуроскопа) КРМ-К2Ц-М разработки научно-производственной фирмы «Специальные Научные Разработки» (СНР). Измерения выполняли в соответствии с требованиями РД ИКЦ «КРАН» – 007-97/02 [22] и Руководства по эксплуатации прибора КРМ-Ц-К2М. Значения H_c , измеренные на отдельных карточках – заготовках перед вырезкой образцов для дальнейших испытаний, составили в среднем $H_c=2$ А/см. Это означает, что металлопрокат из стали 08Ю находился в состоянии поставки в нормализованном состоянии.

Измеряли значения H_c лицевой и обратной сторон защитной панели, представляющую приваренную к каркасу прерывистым швом дуговой сваркой обшивку в виде тонколистового металлопроката.

Первичные значения H_c получали на каждом размеченном участке с обеих сторон панели с учетом расположения (поляризации) сенсорных полюсов магнитодатчиков, вдоль и поперек направления прокатки. Далее определяли значения H_c листа панели на характерных участках панели:

- без видимых визуально следов последствия воздействия прямого излучения, то есть, принятое за исходное;
- вблизи явно выраженного воздействия лазерного излучения на общее состояние панели.

on the metal of the panel were constructed in these experiments. The diagram (Fig. 6) shows an image of isotherm fields characterizing the typical thermal effect of laser radiation during stationary heating. From the results of computational and experimental studies, it follows that the stresses from the thermal effect of laser radiation do not exceed the value of the ultimate strength of the metal of the APMC panels (steel 08Yu). This prevents the occurrence of critical deformations from the thermal effect of laser radiation, which can lead to distortion of the panel shape, causing the panels to loosely adhere to the elements of the cabin frame. Moreover, consequently, it practically excludes the possibility of propagation through slots, gaps and other discontinuities between panels and struts (elements) of the frame of reflected and diffusely scattered laser radiation outside the cabin.

The resulting nomogram (Fig. 6) was used to study the features of the thermal effect of laser radiation on the structural elements of the protective cabin panel. These nomograms were taken into account when sampling and cutting out of the characteristic sections of the panel of samples. For the manufacture of macro- and microsections and subsequent metallographic examination, determination of hardness, as well as mechanical testing.

To determine the physical and mechanical properties of rolled metal and the stress level in individual sections and the cabin as a whole, a special magnetometric control technique was used, based on measuring the coercive force of the metal.

It is known, that there is a fairly stable relationship between the chemical composition of a ferromagnetic material, its mechanical properties, structural, stressed state and coercive force [19–22]. In turn, the mechanical properties are largely determined by the chemical composition of the material, its state after thermomechanical impact (for example, rolling, forging, etc. and types of heat treatment: hardening, normalization, improvement, annealing, etc.). This makes it possible to carry out preliminary calculations of H_c and use them in the future when assessing the stress state of elements, panels and the APMC as a whole.

Measurements of the values of the coercive force were carried out using a coercimeter (magnetic structuraloscope) KRM-K2C-M developed by the research and production company «Special Scientific Research» (SSR). The measurements were carried out in accordance with the requirements of RD ICC «KРАН» – 007-97/02 [22] and the Operation Manual for the KRM-K2Ц-М device. The values of H_c measured on

Обработку результатов измерений проводили по стандартной статистической программе. Строили частотные гистограммы распределения значений измерений H_c с определением математического ожидания MO и среднеквадратического отклонения $СКО$ (рис. 7а). По специально разработанному программному обеспечению, встроенному в коэрцитиметр, выполняли построение цветowych магнитограмм, характеризующих распределение значений H_c по поверхности объекта после обработки результатов показаний коэрцитиметра КРМ-Ц-К2М, полученных при проведении измерений. Изображение (внешний вид) типичных гистограммы и диаграмм (цветных магнитограмм) результатов измерений H_c лицевой (внутренней) стороны, а также металла всей защитной панели в целом представлен на рис. 7.

Анализ результатов измерений, выраженных соответствующими гистограммами и магнитограммами, позволяет сделать вывод, что средние значения H_c металлопроката обратной стороны в горизонтальном (4,67 А/см) и вертикальном (4,95 А/см) направлениях и металлопроката лицевой стороны в горизонтальном (4,72 А/см) и вертикальном (5,01 А/см) направлениях указывают на то, что металлопрокат в исходном состоянии обладал минимальной анизотропией механических свойств в наплавлении вдоль и поперек прокатки. Среднее значение математического ожидания (MO) листа обшивки защит-

separate cards – blanks before cutting out samples for further tests were, on average, $H_c=2$ А/см. This means that rolled metal products of 08Yu steel were in the delivery condition in a normalized condition.

The H_c values of the front and rear sides of the protective panel were measured, which was a skin in the form of a thin sheet metal-roll welded to the frame by an intermittent seam by arc welding.

Primary H_c values were obtained at each marked area on both sides of the panel, taking into account the location (polarization) of the sensor poles of the magnetic sensors, along and across the rolling direction. Next, the H_c values of the panel sheet were determined, on the characteristic sections of the panel:

- without visible traces of the effects of direct radiation, that is, taken as the original;
- near the pronounced effect of laser radiation on the general condition of the panel.

The measurement results were processed using a standard statistical program. Frequency histograms of the distribution of H_c measurements were constructed with the determination of the mathematical expectation (ME) and the standard deviation SD (Fig. 7a). Using specially developed software built into the coercimeter, we built color magnetograms characterizing the distribution of H_c values over the object surface after processing the results of the KRM-K2C-M model coercimeter readings obtained during measurements. The image (appearance) of typical histograms and diagrams (color magnetograms) of the measurement

results of H_c of the front (inner) side, as well as the metal of the entire protective panel as a whole, is shown in Fig. 7.

Analysis of the measurement results, expressed by the corresponding histograms and magnetograms, allows us to conclude that the average values of H_c of rolled metal on the reverse side in the horizontal (4.67 А/см) and vertical (4.95 А/см) directions and metal on the front side in the horizontal (4.72 А/см) and vertical (5.01 А/см) directions, indicate that rolled metal in the initial state had minimal anisotropy of mechanical properties in surfacing along and across rolling. The average value of the mathematical expectation (ME) of the

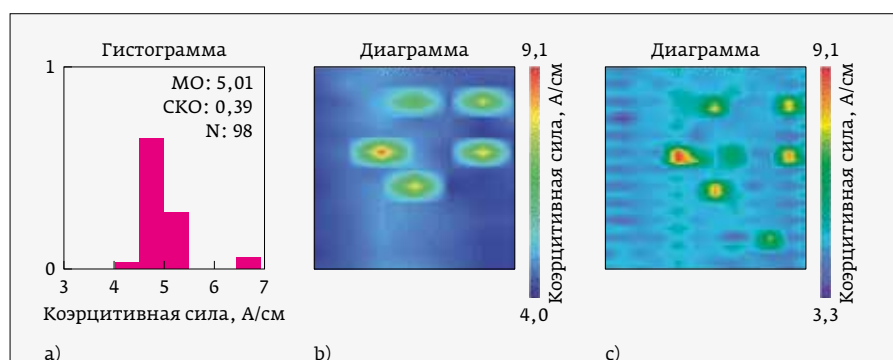


Рис. 7. Типичные гистограмма (а) и диаграммы, построенные по результатам измерений коэрцитивной силы (H_c) лицевой (внутренней) стороны защитной панели (b) и суммарная, для всей панели, построенная по результатам измерения H_c с обеих сторон (c)

Fig. 7. Typical histogram (a) and diagrams based on the results of measurements of the coercive force (H_c) of the front (internal) the sides of the protective panel (b) and the total, for the entire panel, based on the results of measuring the H_c on both sides (c)



ной панели (внутренней и наружной сторон) составляет:

$$MO_{cp.} = (MO_{вн. \rightarrow} + MO_{нар. \uparrow} + MO_{вн. \leftarrow} + MO_{нар. \downarrow}) / 4 = (4,67 + 4,95 + 4,72 + 5,01) / 4 = 4,838 \approx 4,8 \text{ A/cm} \quad (2)$$

В формуле (2) стрелками обозначено расположение (поляризация) сенсоров магнитодатчиков прибора КРМ-К2Ц-М при измерении H_c : \rightarrow - горизонтальное (по направлению прокатки) и \uparrow - вертикальное (под углом 90° к направлению прокатки).

Определение уровня действующих остаточных напряжений в соответствии с предложенной в данной работе методикой исследования базируется на:

- проведении механических испытаний образцов на статическое растяжение;
- измерениях в процессе нагружения коэрцитивной силы (H_c) с построением тарировочной кривой в координатах «коэрцитивная сила - напряжение» при растяжении;
- измерениях H_c исследуемой панели кабины и определении по тарировочной кривой напряжений, действующих в металлоконструкции панели.

Испытания на статическое растяжение плоских образцов, вырезанных из защитной панели (сталь 08Ю) проводили на универсальной испытательной машине LFM-250 фирмы Walter+Bai (Швейцария). Одновременно с растяжением образца измеряли значения коэрцитивной силы (H_c) с помощью магнитного структуроскопа (коэрцитиметра) КРМ-К2Ц-М. По результатам измерений значений H_c , полученным непосредственно в процессе механических испытаний, строили графи-

sheathing sheet of the protective panel (front and rear sides) is:

$$ME_{av.} = (ME_{int. \rightarrow} + MO_{ext. \uparrow} + ME_{int. \leftarrow} + MO_{ext. \downarrow}) / 4 = (4.67 + 4.95 + 4.72 + 5.01) / 4 = 4.838 \approx 4.8 \text{ A/cm} \quad (2)$$

In formula (2), arrows indicate the location (polarization) of the sensors of the magnetic sensors of the KRM-K2C-M model device when measuring H_c : \rightarrow - horizontal (in the direction of rolling) and \uparrow - vertical (at an angle of 90° to the direction of rolling).

DETERMINATION OF THE LEVEL OF THE ACTIVE RESIDUAL STRESSES

The method for determining the level of effective residual stresses is based on the following measurement procedures:

- on carrying out mechanical tests of samples for static tension;
- on the measurement in the process of loading the coercive force (H_c) with the construction of a calibration curve in the coordinates «coercive force - stress» in tension;
- on the measurement of H_c of the investigated panel of the cabin and on the determination of the stresses acting in the metal structure of the panel according to the calibration curve.

Static tensile tests of flat specimens cut from a protective panel (08Yu steel) were carried out on an universal testing machine LFM-250 (Walter + Bai AG, Switzerland). Simultaneously with the stretching of the sample, the values of the coercive force (H_c) were measured using a magnetic structroscope (coercitimeter) of the KRM-K2C-M model.

Based on the results of measuring the H_c values obtained directly in the process of mechanical tests, a graphical dependence was built in the coordinates: «flow stress - coercive force», which was used as a calibration curve (Fig. 8).

Using the constructed calibration curve, according to the experimental values of the coercive force, the stress level in the metal of the panel was determined and the stress state in the panel of the protective cabin as a whole was estimated. It should be noted that previously measured on separate blank cards cut from a sheet before making samples for further tests,

Таблица 4. Изменение значений H_c и остаточных напряжений в листовом металлопрокате толщиной 1 мм из стали 08Ю в зависимости от состояния
Table 4. Change in the values of H_c and residual stresses in sheet metal products 1 mm thick made of 08Yu steel, depending on the state

Состояние поставки As-delivered state	После приварки панелей к каркасу After panels are welded to the frame	После лазерного воздействия After laser impact	Значения σ_b при растяжении: эксперимент / справочник Values of σ_b in tension: experiment / reference
H_c (A/cm) H_c (A/cm)			
2	4,8	6,3...6,6	
Напряжения σ (МПа) Stresses σ (MPa)			
Практически отсутствуют Practically absent	≤ 170	≤ 284	303/360

ческую зависимость в координатах: «напряжение течения – коэрцитивная сила», которую использовали в качестве тарировочной кривой (рис. 8). С использованием построенной тарировочной кривой, по экспериментальным значениям коэрцитивной силы определяли уровень напряжений в металле панели и оценивали напряженное состояние в панели защитной кабины в целом. Следует отметить, что ранее измеренные на отдельных, вырезанных из листа карточках – заготовках перед изготовлением образцов для дальнейших испытаний значения H_c составили в среднем $H_c=2$ А/см. Полученное экспериментально значение H_c защитной панели после сварки листа к каркасу до лазерного воздействия на лицевой (внутренней) и наружной (внешней) стороны защитной панели составляет в среднем $H_c=4,8$ А/см (табл. 4).

Как видно из табл. 4 увеличение в 2,4 раза ($4,8/2$) значений H_c характеризует возрастание напряжений в металлоконструкции панели МКАЗ, вызванное сваркой тонколистовой обшивки к каркасу.

Из графика (рис. 8) следует, что по значениям коэрцитивной силы H_c , измеренной в металле исследуемой панели после лазерного воздействия ($H_c=6,3-6,6$ А/см), напряжения в металлоконструкции панели защитной кабины не превышают значений $\sigma=26$ кг/мм² (284 МПа), что ниже значений предела прочности для стали 08Ю, составляющего:

- экспериментально, при растяжении $\sigma_b=30,9$ кг/мм² (303 МПа);
- по справочникам свойств стали 08Ю $\sigma_b=37$ кг/мм² (360 МПа).

Таким образом, расчетно-экспериментальным методом измерения коэрцитивной силы установлено, что напряжения $\sigma=26$ кг/мм² (284 МПа) не являются столь критичными для того, чтобы способствовать накоплению повреждений в металле панелей под воздействием исследуемых факторов при эксплуатации МКАЗ. Результаты оценки напряженного состояния панели свидетельствует о функциональной надежности элементов МКАЗ и кабины в целом, являющейся самостоятельной сборной металлоконструкцией.

В результате исследований, выполненных по разработанной методике, экспериментально установлено и подтверждено на практике, что созданные МКАЗ обеспечивают высокие показатели надежности и уровня комплексной защиты от воздействия лазерного излучения (отраженного и диффузорасеянного) на персонал, находящийся вне защитной кабины. Это является важным фактором, направленным на ускоренное решение проблем по рас-

the values of H_c were, on average, $H_c = 2$ А/см. The experimentally obtained value of H_c of the protective panel after welding the sheet to the frame before laser action on the front and rear (outer) sides of the protective panel is on average, $H_c=4.8$ А/см (Table 4).

As you can see from the table. 4, an increase in 2.4 times ($4.8/2$) values of H_c characterizes an increase in stresses in the metal structure of the APMC panel caused by welding a thin-sheet sheathing to the frame.

It follows from the graph (Fig. 8) that according to the values of the coercive force H_c , measured in the metal of the panel under study after laser impact ($H_c=6.3-6.6$ А/см), the stresses in the metal structure of the protective cabin panel do not exceed $\sigma=26$ кг/мм² (284 МПа), which is lower than the tensile strength values for steel 08Yu, which is:

- experimentally, with tension $\sigma=30.9$ кг/мм² (303 МПа);
- according to the reference books of properties of steel 08Yu $\sigma=37$ кг/мм² (360 МПа).

Thus, it was found by the calculation and experimental method for measuring the coercive force that stresses $\sigma=26$ кг/мм² (284 МПа) are not so critical in

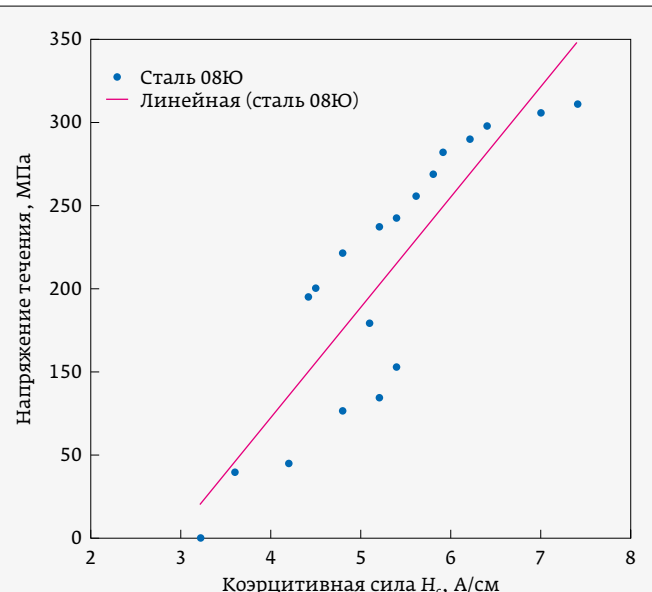


Рис. 8. Номограмма (тарировочный график) для контроля напряженного состояния по экспериментальным значениям H_c элементов МКАЗ из стали 08Ю: кружки – данные эксперимента; прямая – линейная аппроксимация [18]

Fig. 8. Nomogram (calibration graph) for stress state control according to experimental values of H_c of APMC elements made of 08Yu steel (bullets – experimental data; straight line – linear approximation, source [18])

ширению области внедрения технологий лазерной обработки в сферу промышленного производства отечественных предприятий металлургии и машиностроения.

Результаты оценки эксплуатационной надежности кабин с активной защитой по двухуровневой методике свидетельствуют о том, что кабины МКАЗ данной конструкции обеспечивают высокий показатель уровня защиты от воздействия лазерного излучения на серийных комплексах лазерной обработки. Прежде всего – от воздействия прямого лазерного излучения (за счет оснащения САОЛИ) и в дополнение – от воздействия побочных негативных явлений: отраженного и диффузорасеянного лазерного излучения на персонал, находящийся вне защитной кабины при выполнении конкретных технологических процессов лазерной обработки.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Для комплексной оценки эксплуатационной надежности МКАЗ разработана и реализована на практике расчетно-экспериментальная двухуровневая методика. В настоящем исследовании представлены результаты экспериментов, выполненных по двухуровневой методике.

order to contribute to the accumulation of damage in the metal of the panels under the influence of the factors under study during the operation of the APMC. The results of the assessment of the stress state of the panel indicate the functional reliability of the APMC elements and the cabin as a whole, which is an independent prefabricated metal structure.

As a result of investigation carried out according to the developed methodology, it was experimentally established and confirmed in practice that the created APMC provide high strength indicators and a level of comprehensive protection against the effects of laser radiation (reflected and diffusely scattered) on personnel outside the protective cabin. This is an important factor aimed at accelerating the solution of the problems of expanding the field of implementation of laser processing technologies in the industrial production of domestic metallurgy and mechanical engineering enterprises.

The results of evaluating the operational reliability of cabins with active protection using a two-level method indicate that APMC of this design provide a high level of protection against the effects of laser radiation on serial laser processing complexes. First of all, from the impact of direct laser radiation (due to the equipment of the LRESS) and, in addition, from the impact of side negative phenomena: reflected

КАЗАНЬ 2021



**МАШИНОСТРОЕНИЕ
МЕТАЛЛООБРАБОТКА
СВАРКА**

1-3/12

ОСНОВНЫЕ ЦИФРЫ ВЫСТАВКИ 2019 ГОДА

223 компаний <small>из 29 регионов России и 15 из стран мира</small>	9013 посетителей <small>из 60 городов РФ и 8 стран мира</small>	4031 кв. м. <small>выставочной площади</small>
--	---	--

21-я международная специализированная выставка
ОБОРУДОВАНИЯ, ПРИБОРОВ И ИНСТРУМЕНТОВ ДЛЯ МАШИНОСТРОИТЕЛЬНОЙ,
МЕТАЛЛООБРАБАТЫВАЮЩЕЙ И СВАРОЧНОЙ ОТРАСЛЕЙ ПРОМЫШЛЕННОСТИ

Оргкомитет выставки
Тел/факс: [843] 202-29-03
Россия, 420059, г. Казань,
Оренбургский тракт, д. 8,
ОАО «Казанская ярмарка»
www.expomach.expokazan.ru
E-mail: expo-kazan@mail.ru

 Место проведения:
МВЦ «Казань Экспо»





Забронировать
СТЕНД

16+





На первом уровне методики – экспериментальным определением времени «срабатывания» САОЛИ на МКАЗ при выполнении технологического процесса лазерной наплавки. Выполняли оценку эффективности экстренного автоматического отключения лазерного излучения при работающем лазерном генераторе непрерывного действия с волоконной оптической системой максимальной мощностью 6 кВт. На втором уровне исследовали воздействие лазерного излучения на структурные и физико-механические характеристики металла, напряженное состояние, а также эксплуатационные свойства элементов МКАЗ.

Расчетно-экспериментальным путем установлено:

1. Экспериментально доказана эффективность «срабатывания» системы аварийного отключения лазерного излучения при работающем источнике лазерного излучения мощностью 6 кВт на серийном комплексе лазерной обработки. САОЛИ обеспечивает «срабатывание» датчиков, настроенных на экстренное отключение лазерного генератора от сетевого питания за заданный минимальный промежуток времени.
2. Увеличение уровня напряжений в элементах металлоконструкции под воздействием исследуемых факторов, вызванных ЛИ, не являются столь критичным для того, чтобы способствовать накоплению повреждений в металле панелей при эксплуатации МКАЗ.
3. Тепловое воздействие ЛИ на структуру, физико-механические свойства металла и напряженное состояние исследуемого элемента защитной кабины с установленным датчиком, чувствительным к воздействию ЛИ, не снижает эксплуатационных качеств самого датчика и металлоконструкции панели, что свидетельствует о надежности системы защиты кабины в целом.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. СанПин 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания».
2. **О.А. Крючина, В.П. Минаев.** Новый СанПин 1.2.3685-21. Состояние отечественной нормативной базы по лазерной безопасности. *Лазер-Информ.* 2021; 5-6 (692-693):7.
3. ГОСТ Р 12.1.040-83 ССБТ. Система стандартов безопасности труда. Лазерная безопасность. Общие положения.
4. ГОСТ ИЕС 60825-4-2014. Безопасность лазерной аппаратуры. Часть 4. Средства защиты от лазерного излучения.
5. СТБ ИЕС 60825-1-2011. Безопасность лазерных изделий. Часть 1. Классификация оборудования и требования.
6. ГОСТ 31581-2012. Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий.
7. ГОСТ ЕН 12626-2006. Безопасность металлообрабатывающих станков. Станки для лазерной обработки.

and diffusely scattered laser radiation on personnel outside the protective cabin when performing specific technological laser processing processes.

CONCLUSION

For a comprehensive assessment of the operational reliability of APMC, a two-level design and experimental technique has been developed and implemented in practice. This study presents the results of experiments performed using a two-level technique.

At the first level of the methodology, the experimental determination of the time of the «response» of the LRESS on the APMC during the implementation of the technological process of laser cladding. Evaluation of the efficiency of emergency automatic shutdown of laser radiation was carried out when operating a continuous laser generator with a fiber optic system with a maximum power of 6 kW. At the second level, the effect of laser radiation on the structural and physical-mechanical characteristics of the metal, the stress state, as well as the operational properties of the APMC elements was investigated.

It is established by means of calculation and experiments:

- The activation efficiency of the emergency shutdown system of laser radiation with a working laser source with a power of 6 kW at a serial laser processing complex has been experimentally proved. LRESS provides «triggering» of sensors configured for emergency disconnection of the laser generator from the mains supply for a specified minimum period of time.
- The increase in the level of stresses in the elements of the metal structure under the influence of the investigated factors caused by LR are not so critical in order to contribute to the accumulation of damage in the metal of the panels during the operation of the APMC.
- The thermal effect of LR on the structure, physical and mechanical properties of the metal and the stress state of the investigated element of the protective cabin with an installed sensor sensitive to LR does not reduce the performance of the sensor itself and the metal structure of the panel, which indicates the reliability of the cab protection system as a whole.

REFERENCES

1. SanPin 1.2.3685-21 «Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (iii) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov srede obitaniya».
2. **O.A. Kryuchina, V.P. Minaev.** Novyj SanPin 1.2.3685-21. Sostoyanie otechestvennoj normativnoj bazy po lazernoj bezopasnosti. *Lazer-Inform.* 2021; 5-6 (692-693):7.
3. GOST R 12.1.040-83 SSBT. Sistema standartov bezopasnosti truda. Lazernaya bezopasnost'. Obshchie polozheniya.

weldex

россварка

21-я МЕЖДУНАРОДНАЯ
ВЫСТАВКА СВАРОЧНЫХ
МАТЕРИАЛОВ, ОБОРУДОВАНИЯ
И ТЕХНОЛОГИЙ

12-15 | МОСКВА
ОКТАБРЕ 2021 | МВЦ
КРОКУС ЭКСПО

ПОЛУЧИТЕ БЕСПЛАТНЫЙ
БИЛЕТ ПО ПРОМОКОДУ
wlx21i0NTU

WELDEX.RU

0+

+7 (499) 750-08-28
weldex@hyve.group

Официальная
поддержка:



Генеральный
информационный
партнер:



Журнал
«Сварочное производство»





8. Рахманов Б. Н., Кибовский В. Т. Лазер. Все же какого он класса опасности. Часть I. Фотоника. 2015; 5 (53):42–49.
9. Желтов Г. И. О нормативах по лазерной безопасности. Лазер-Информ. 2018; 15-16: 630-631.
10. Крючина О. А., Садовников И. Э. Гармонизация со стандартами Европейского Союза: вопросы, проблемы, решения. Фотоника. 2020; 14(1): 56-64.
11. ГОСТ Р 12.1.011-89 ССБТ. Система стандартов безопасности труда. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация.
12. ГОСТ 12.4.308-2016 (EN207:2009) Система стандартов безопасности труда. Средства индивидуальной защиты глаз. Очки для защиты от лазерного излучения. Общие технические требования и методы испытаний.
13. Рахманов Б. Н., Кезик В. И., Кибовский В. Т., Пономарёв В. М. Правила определения предельно допустимых уровней при одновременном воздействии на глаза и кожу лазерного излучения с различными длинами волн. Медицина труда и промышленная экология. 2018;(12):35-38.
14. Рахманов Б. Н., Кибовский В. Т. Оценка степени опасности и ослепляющего действия лазерных изделий, работающих на открытых пространствах в видимой и ближней ИК-областях спектра. Безопасность жизнедеятельности. Приложение. 2004; 1: 1-24.
15. ГОСТ Р 12.1.031-2010. ССБТ. Лазеры. Методы дозиметрического контроля лазерного излучения.
16. Крючина О. А., Садовников И. Э. Проблемы проведения измерений облучённости в процессе лазерной обработки металлов. Фотоника. 2019; 13(3): 308-311.
17. Крючина О. А., Шиганов И. Н., Садовников И. Э. Совершенствование методики контроля отражённого и рассеянного излучения при лазерных технологических процессах. Охрана труда в машиностроении. Технология машиностроения. 2021;(1):63-67.
18. Крючина О. А., Люхтер А. Б., Криворотов В. И., Садовников И. Э., Безносков П. В., Луконин А. В. Комплексная оценка эксплуатационной надёжности модульной кабины с активной защитой (МКАЗ) от воздействия лазерного облучения. Фотоника. 2021;(15): 282-295.
19. Богачёва Н. Д. Расширение возможности применения метода коэрцитивной силы. В мире неразрушающего контроля. 2005; 2(28): 8-10.
20. Бидя Г. В. Размер зерна и корреляция прочностных, пластических и вязких свойств с коэрцитивной силой ферритно-перлитных сталей. Техническая диагностика и неразрушающий контроль. 2010; 4: 40-45.
21. Безлюдько Г. Я., Елкина Е. И., Карабин В. В., Попов Б. Е., Криворотов В. И. Новый подход к оценке состояния сварных соединений. Мир сварки. 2010; 15: 44-49.
22. РД ИКЦ «КРАН»-007-97/02. «Магнитный контроль напряженно-деформированного состояния и остаточного ресурса подъемных сооружений при проведении их обследования и техническом диагностировании (экспертизе промышленной безопасности)».
23. ГОСТ5639-82. Сталь и сплавы. Методы выявления и определения величины зерна.
24. ASTM E112; ASTM E1382. Анализ величины зерна в сталях и сплавах.
25. ГОСТ 2999-75. Металлы и сплавы. Метод измерения твердости по Виккерсу.
26. Григорович В. К. Твёрдость и микротвёрдость металлов. - М.: Наука. 1976. 230 с.
27. Дель Г. Д. Определение напряжений в пластической области по распределению твердости. - М.: Машиностроение. 1971. 199 с.
28. Матюнин В. М., Терентьев В. Ф., Марченков А. Ю., Слизов А. К. Методика определения твердости и других механических свойств тонколистовой трип-стали индентированием. Заводская лаборатория. Диагностика материалов. 2017; 83(7): 49-53.
29. Кроха В. А. Упрочнение металлов при холодной пластической деформации. Справочник. - М.: Машиностроение. 1980. 157 с.
30. Махненко В. И. Расчётные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций. - М.: Машиностроение. 1976. 320 с.
31. Рыкалин Н. Н. Расчёты тепловых процессов при сварке. - М.: Mashgiz. 1951. 296 с.
32. Винокуров В. А., Григорьянц А. Г. Теория сварочных деформаций и напряжений. - М.: Машиностроение. 1984. 273 с.
4. GOST IEC 60825-4-2014. Bezopasnost' lazernoj apparatury. CHast' 4. Sredstva zashchity ot lazernogo izlucheniya.
5. STB IEC 60825-1-2011. Bezopasnost' lazernykh izdelij. CHast' 1. Klassifikatsiya oborudovaniya i trebovaniya.
6. GOST 31581-2012. Lazernaya bezopasnost'. Obshchnie trebovaniya bezopasnosti pri razrabotke i ekspluatatsii lazernykh izdelij.
7. GOST EN 12626-2006. Bezopasnost' metalloobrabatyvayushchih stankov. Stanki dlya lazernoj obrabotki.
8. Rahmanov B. N., Kibovskij V. T. Laser. After all What Class of Hazard is It? Part II. Photonics Russia. 2015; 5 (53):42–49.
9. ZHeltov G. I. O normativah po lazernoj bezopasnosti. Lazer-Inforn. 2018; 15-16: 630-631.
10. Kryuchina O. A., Sadovnikov I. E. Harmonization with European Union Standards: Issues, Problems, Solutions. Photonics Russia. 2020; 14(1): 56-64.
11. GOST R 12.1.011-89 SSBT. Sistema standartov bezopasnosti truda. Sredstva zashchity rabotayushchih. Obshchnie trebovaniya i klassifikatsiya.
12. GOST 12.4.308-2016 (EN207:2009) Sistema standartov bezopasnosti truda. Sredstva individual'noj zashchity glaz. Oчки dlya zashchity ot lazernogo izlucheniya. Obshchnie tekhnicheskie trebovaniya i metody ispytaniy.
13. Rahmanov B. N., Kezik V. I., Kibovskij V. T., Ponomaryov V. M. Pravila opredeleniya predel'no dopustimyh urovnej pri odnovremennom vozdejstvii na glaza i kozhu lazernogo izlucheniya s razlichnymi dlinami voln. Medicina truda i promyshlennaya ekologiya. 2018;(12):35-38.
14. Rahmanov B. N., Kibovskij V. T. Ocenka stepeni opasnosti i osleplyayushchego dejstviya lazernykh izdelij, rabotayushchih na otkrytykh prostranstvah v vidimoy i blizhney IK-oblastyah spektra. Bezopasnost' zhiznedeyatel'nosti. Prilozhenie. 2004; 1: 1-24.
15. GOST R 12.1.031-2010. SSBT. Lazery. Metody dozimetricheskogo kontrolya lazernogo izlucheniya.
16. Kryuchina O. A., Sadovnikov I. E. Problemy provedeniya izmerenij obluchyonnosti v processe lazernoj obrabotki metallov. Fotonika. 2019; 13(3): 308-311.
17. Kryuchina O. A., Shiganov I. N., Sadovnikov I. E. Sovershenstvovanie metodiki kontrolya otrazhyonnogo i rassayanogo izlucheniya pri lazernykh tekhnologicheskikh procesсах. Ohrana truda v mashinostroyeni. Tekhnologiya mashinostroyeniya. 2021;(1):63-67.
18. Kryuchina O. A., Lyuhter A. B., Krivorotov V. I., Sadovnikov I. E., Beznosov P. V., Lukonin A. V. Kompleksnaya ocenka ekspluatatsionnoj nadyozhnosti modul'noj kabiny s aktivnoy zashchitoy (MKAZ) ot vozdejstviya lazernogo oblucheniya. Fotonika. 2021;(15): 282-295.
19. Bogachyova N. D. Rasshirenie vozmozhnosti primeneniya metoda koercitivnoy sily. V mire nerazrushayushchego kontrolya. 2005; 2(28): 8-10.
20. Bida G. V. Razmer zerna i korrelyatsiya prochnostnykh, plasticheskikh i vyazkikh svoystv s koercitivnoy siloy ferritno-perlitnykh stalej. Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchij kontrol'. 2010; 4: 40-45.
21. Bezlyud'ko G. YA., Yolkina E. I., Karabin V. V., Popov B. E., Krivorotov V. I. Novyj podhod k ocenke sostoyaniya svarnykh soedinenij. Mir svarki. 2010; 15: 44-49.
22. RD IKC "KРАН"-007-97/02. "Magnitnyj kontrol' napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya i ostatochnogo resursa pod'emnykh sooruzhenij pri provedenii ih obsledovaniya i tekhnicheskom diagnostirovani (ekspertize promyshlennoy bezopasnosti)".
23. GOST5639-82. Stal' i splavy. Metody vyvayeniya i opredeleniya velichiny zerna.
24. ASTM E112; ASTM E1382. Analiz velichiny zerna v stal'yah i splavah.
25. GOST 2999-75. Metally i splavy. Metod izmereniya tverdosti po Vikkersu.
26. Grigorovich V. K. Tvorydost' i mikrotvorydost' metallov. - M.: Nauka. 1976. 230 s.
27. Del' G. D. Opredelenie napryazhenij v plasticheskoy oblasti po raspredeleniyu tvorydosti. - M.: Mashinostroyeniye. 1971. 199 s.
28. Matyunin V. M., Terent'ev V. F., Marchenkov A. YU., Slizov A. K. Metodika opredeleniya tvorydosti i drugih mekhanicheskikh svoystv tonkolistovoy trip-stali indentirovaniem. Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov. 2017; 83(7): 49-53.
29. Kroha V. A. Uprochnenie metallov pri holodnoy plasticheskoy deformatsii. Spravochnik. - M.: Mashinostroyeniye. 1980. 157 s.
30. Mahnenko V. I. Raschyotnye metody issledovaniya kinetiki svarochnykh napryazhenij i deformatsij. - M.: Mashinostroyeniye. 1976. 320 s.
31. Rykalin N. N. Raschyoty teplovykh processov pri svarke. - M.: Mashgiz. 1951. 296 s.
32. Vinokurov V. A., Grigor'yanc A. G. Teoriya svarochnykh deformatsij i napryazhenij. - M.: Mashinostroyeniye. 1984. 273 s.

ОБ АВТОРАХ

Александр Люхтер, к. т. н., Владимирский государственный университет им. А. Г. и Н. Г. Столетовых, Владимир, Россия.
ORCID: 0000-0003-1523-0637

Валерий Криворотов, к. т. н., VKrivorotov@ntoire-polus.ru; начальник отдела сертификации, аттестации и стандартизации, ООО НТО «ИРЭ-Полус», Фрязино, Моск. обл., Россия.

Константин Скворцов, к. т. н., Владимирский юридический институт Федеральной службы исполнения наказаний (ВЮИ ФСИН России), Владимир, Россия.
ORCID: 0000-0001-8611-3353

AUTHORS

A. B. Lyuchter. Cand. of Science. Vladimir State University named after A.G. and N. G. Stoletovs, 3699137@mail.ru, Vladimir, Russia.

ORCID: 0000-0003-1523-0637

V. I. Krivorotov. Cand. of Science. NTO IRE-Polyus LLC, vKrivorotov@ntoire-polus.ru, Fryazino, Moscow region, Russia

K. V. Skvortsov. Cand. of Science. Vladimir Law Institute of the Federal Penitentiary Service of Russia (VLI of FPS of Russia), k-skv@yandex.ru, Vladimir, Russia.

ORCID 0000-0001-8611-3353

18–21.10.2021



В рамках проекта «Наука-Технологии-Инновации Экспо»
международная политехническая выставка

ТЕХНОФОРУМ



МИНПРОМТОРГ
РОССИИ



www.technoforum-expo.ru

Организатор

 **ЭКСПОЦЕНТР**

При поддержке:

- Государственной Думы Федерального Собрания РФ
- Министерства промышленности и торговли РФ

Под патронатом ТПП РФ

Реклама



**«Оборудование
и технологии
обработки
конструкционных
материалов»**

Россия, Москва,
ЦВК «ЭКСПОЦЕНТР»