DOI: 10.22184/1993-7296.FRos.2021.15.4.282.295

Комплексная оценка эксплуатационной надежности модульной кабины с активной защитой от воздействия лазерного облучения

О. А. Крючина[1], А. Б. Люхтер[2], В. И. Криворотов[1], И. Э. Садовников, П. В. Безносов[1], А. В. Луконин[1]
[1] *ООО НТО «ИРЭ-Полюс», г. Фрязино, Моск. обл., Россия*
[2] *Владимирский государственный университет имени А. Г. и Н. Г. Столетовых, г. Владимир, Россия*

Представлены результаты комплексной оценки эксплуатационной надежности модульной кабины с активной защитой от воздействия лазерного облучения. Работа проводилась в два этапа. На начальном этапе разработана и реализована на практике расчетно-экспериментальная двухуровневая методика, включающая на первом уровне определение времени срабатывания системы аварийной защиты от лазерного излучения в модульной кабине при работающем лазерном генераторе непрерывного действия с волоконной оптической системой максимальной мощностью 6 кВт. На втором уровне выполнялась оценка напряженного состояния и несущей способности элементов модульной кабины. Показаны преимущества модульной кабины по оснащенности средствами защиты перед защитными кабинами обычного (без активной защиты) исполнения. На заключительном этапе после двухуровневых исследований была проведена оценка надежности защиты модульной кабины от отраженного и рассеянного излучения при использовании в лазерных технологических процессах.

Ключевые слова: лазерные технологические установки; модульные кабины с активной защитой (МКАЗ); двухуровневая методика исследований; система аварийной защиты

Comprehensive Assessment of the Operational Reliability of a Modular Cabin With Laser Radiation Active Protection

O. A. Kryuchina[1], A. B. Lyukhter[2], V. I. Krivorotov[1], I. E. Sadovnikov[1], P. V. Beznosov[1], A. V. Lukonin[1]
[1] *NTO IRE-Polyus LLC, Fryazino, Moscow region, Russia*
[2] *Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, Vladimir, Russia*

The results of a comprehensive assessment of the operational reliability of a modular cabin with active protection against the effects of laser radiation are presented. The work was carried out in two stages. At the initial stage, a computational and experimental two-level technique was developed and implemented in practice, including, at the first level, determining the response time of the emergency protection system against laser radiation in a modular cabin with a continuous laser generator with a fiber optic system operating with a maximum power of 6 kW. At the second level, the stress state and bearing capacity of the elements of the modular cabin were assessed. The advantages of a modular cabin in terms of equipping with protection means are shown over protective cabins of a conventional (without active protection) design. At the final stage, after two-level studies, the reliability of the protection of the modular cabin from reflected and scattered radiation during laser technological processes was assessed.

Keywords: laser technological installations; modular cabins with active protection (MCAP); two-level research methodology; laser radiation emergency protection system (LREPS); high-power fiber lasers; direct, diffusely scattered and reflected laser radiation; stressful condition; load bearing capacity; reliability of cabin elements; protection against reflected and scattered radiation during laser technological processes;

от лазерного излучения (САОЛИ); мощные волоконные лазеры; прямое, диффузно-рассеянное и отраженное лазерное излучение; напряженное состояние; несущая способность; надежность элементов кабины; защита от отраженного и рассеянного излучения при лазерных технологических процессах; облученность от лазерного излучения; параметры световой среды.

Статья поступила: 20.03.2021
Статья принята: 24.05.2021

ВВЕДЕНИЕ

Одним из факторов успешного внедрения лазерных технологических комплексов и технологий лазерной обработки в промышленное производство является выполнение требований лазерной безопасности (ЛБ), предписанных (отечественной и мировой) нормативной документацией. После отмены СН № 5804-91 «Санитарных норм и правил устройства и эксплуатации лазеров», СанПиН 2.2.4.3359-16 «Санитарно-эпидемиологические требования к физическим факторам на рабочих местах» и СП 2.2.2.1327-03 «Гигиенические требования к организации технологических процессов, производственному оборудованию и рабочему инструменту» в силу вступили два новых документа СанПиН 1.2.3685-21 «Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания» и СП 2.2.3670-20 «Санитарно-эпидемиологические требования к условиям труда».

В СанПиН 1.2.3685-21 приведены только предельно допустимые уровни (ПДУ) для лазерного излучения. До недавнего времени безопасное применение лазерных изделий согласовывалось с представителями Роспотребнадзора. СП 2.2.3670-20 дают ссылку к специальной оценке условий труда, которую выполняют аккредитованные организации. Требования к лазерам в документе указаны только в одном пункте.

Описание основных требований – к конструкции лазерных изделий (блокировки, пульты управления и др.), к размещению лазерных изделий в помещениях, к вводу в эксплуатацию и эксплуатации лазерных изделий, к персоналу, к применению средств индивидуальной защиты, к маркировке и предупреждающим знакам – осталось в стандартах. В целях обеспечения безопасности и защиты от возможных вредных и опасных факторов на рабочих местах предприятий проводятся организационные;

exposure from laser radiation; parameters of the light environment.

Received on: 20.03.2021
Accepted on: 24.05.2021

INTRODUCTION

One of the factors for the successful implementation of laser technological complexes and laser processing technologies in industrial production is the fulfillment of laser safety (LS) requirements prescribed by (domestic and world) regulatory documents. After the abolition of SN No. 5804-91 “Sanitary norms and rules for the construction and operation of lasers”, SanPiN 2.2.4.3359-16 “Sanitary and epidemiological requirements for physical factors at workplaces” and SP 2.2.2.1327-03 “Hygienic requirements for the organization of technological processes, production equipment and working tools “entered into force two new documents SanPiN 1.2.3685-21 “Hygienic standards and requirements for ensuring the safety and (or) harmlessness to humans of environmental factors” and SP 2.2.3670-20 “Sanitary and epidemiological requirements to working conditions”.

SanPiN 1.2.3685-21 contains only maximum permissible levels (MPL) for laser radiation. Until recently, the safe use of laser products was coordinated with representatives of Federal Service for the Oversight of Consumer Protection and Welfare (Rospotrebnadzor). SP 2.2.3670-20 give a link to a special assessment of working conditions, which is carried out by accredited organizations. Requirements for lasers in the document are specified in only one paragraph.

Basic requirements – for the design of laser products (interlocks, control panels, etc.), to the placement of laser products in the premises, to commissioning and operation of laser products; to the staff, to the use of personal protective equipment, to markings and warning signs – remained in the standards. In order to ensure safety and protection from possible harmful and dangerous factors at the workplaces of enterprises, organizational; technical; sanitary and hygienic and medical and preventive measures. The technical measures include, among other things, the design of protective equipment [1–7].

This paper presents the results of studies on assessing the effectiveness of means and methods of protection against laser radiation of personnel serving laser equipment when performing specific technological processes of laser processing. The object of this research and testing is a modular cabin with active protection (MCAP), which, in terms of equipping with protection means, has undoubted advantages over protective cabins (PC) of a conventional (without active protection) design.

технические; санитарно-гигиенические и лечебно-профилактические мероприятия. К техническим мероприятиям относится в том числе проектирование средств защиты [1–7].

В данной работе представлены результаты исследований по оценке эффективности средств и методов защиты от лазерного излучения персонала, обслуживающего лазерное оборудование при выполнении конкретных технологических процессов лазерной обработки. Объектом настоящего исследования и испытаний является модульная кабина с активной защитой (МКАЗ), обладающая по оснащенности средствами защиты несомненными преимуществами по сравнению с защитными кабинами (ЗК) обычного (без активной защиты) исполнения.

ОЦЕНКА ЭКСПЛУАТАЦИОННОЙ НАДЕЖНОСТИ МОДУЛЬНОЙ КАБИНЫ С АКТИВНОЙ ЗАЩИТОЙ

Оценка эксплуатационной надежности МКАЗ проводилась по специально разработанной расчетно-экспериментальной двухуровневой методике [8]. На первом уровне методики экспериментальным определением времени срабатывания системы аварийного отключения лазерного излучения (САОЛИ) на МКАЗ оборудования для лазерной наплавки выполнялась оценка эффективности экстренного автоматического отключения лазерного излучения при работающем лазерном генераторе непрерывного действия с волоконной оптической системой максимальной мощностью 6 кВт. На втором уровне исследовалось воздействие лазерного излучения на структурные и физико-механические характеристики металла, напряженное состояние, а также эксплуатационные свойства элементов МКАЗ. Учитывались заложенные при проектировании и изготовлении МКАЗ конструктивные технические решения (рис. 1). На одной из панелей МКАЗ закреплены высокочувствительные датчики, реагирующие на лазерное излучение, являющиеся основополагающими высокочувствительными приборами, определяющими функциональное назначение и принцип работы САОЛИ, которые состоят в следующем. При случайном попадании лазерного луча на любой элемент кабины САОЛИ обеспечивает формирование аварийного сигнала отключения источника лазерного излучения для предотвращения распространения лазерного излучения (ЛИ) за пределы защитного ограждения кабины. Чувствительные элементы датчика заложены в пространство между двойной стенкой панели. При попадании ЛИ на переднюю стенку панели происходит ее разогрев с последующим прожигом/разрушением области воздей-

ASSESSMENT OF THE OPERATIONAL RELIABILITY OF A MODULAR CABIN WITH ACTIVE PROTECTION

The assessment of the operational reliability of MCAP was carried out according to a specially developed calculation and experimental two-level technique [8]. At the first level of the methodology, by experimentally determining the time of the "actuation" of the laser radiation emergency protection system (LREPS) at the MCAP laser cladding equipment, the effectiveness of the emergency automatic shutdown of laser radiation was evaluated when a continuous laser generator with a fiber optic system with a maximum power of 6 kW was operating. At the second level, the effect of laser radiation on the structural and physicomechanical characteristics of the metal, the stress state, as well as the operational properties of MCAP elements was investigated. The structural technical solutions incorporated in the design and manufacture of MCAP were taken into account (Fig. 1). On one of the MCAP panels, highly sensitive sensors are fixed that react to laser radiation, which are the fundamental highly sensitive devices that determine the functional purpose and principle of operation of the LREPS, which are as follows. In the event of an accidental hit of a laser beam on any element of the cabin, the LREPS provides the formation of an emergency signal for switching off the laser radiation source to prevent the propagation of laser radiation (LR) beyond the safety barrier of the cabin. Sensitive elements of the sensor are embedded in the space between the double wall of the panel. When the LR hits the front wall of the panel, it heats up, followed by burning/destruction of the affected area. Reflected, diffusely scattered (re-reflected) LR, transmitted as a result of exposure to the inner surface of any of the panels, the spectrum of which falls within the sensitivity range of the applied photodiode (λ=850–1100 nm), is recorded by the LREPS module (Fig. 1). Thus, LREPS provides the formation of an emergency signal for switching off the laser radiation source, which excludes the propagation of LR outside the cabin [7, 9–11].

The tests were carried out according to the program regulating the order (sequence) of the tests in accordance with the selected experimental modes (table. one).

The criterion for a positive test result is the absence of a through hole in the back wall of the LREPS panel. Additionally, the results of the effect of the thermal effect of LR on the rear wall material were evaluated using an Olimpus GX optical microscope. The test results were documented in the form of a test report.

As a result of research and experiments, it was found that LREPS with a high degree of reliability performs an emergency disconnection of the laser generator from the mains supply for a specified minimum period of time

ствия. Отраженное, диффузно-рассеянное (переотраженное) ЛИ, прошедшее в результате воздействия на внутреннюю поверхность любой из панелей, спектр которого попадает в диапазон чувствительности применяемого фотодиода (λ=850–1100 нм), регистрируется модулем САОЛИ (рис. 1). Таким образом САОЛИ обеспечивает формирование аварийного сигнала отключения источника лазерного излучения, исключающего распространение ЛИ за пределы кабины [7, 9–11].

Испытания проводились по программе, регламентирующей порядок (последовательность) проведения испытаний в соответствии с выбранными режимами эксперимента (табл. 1).

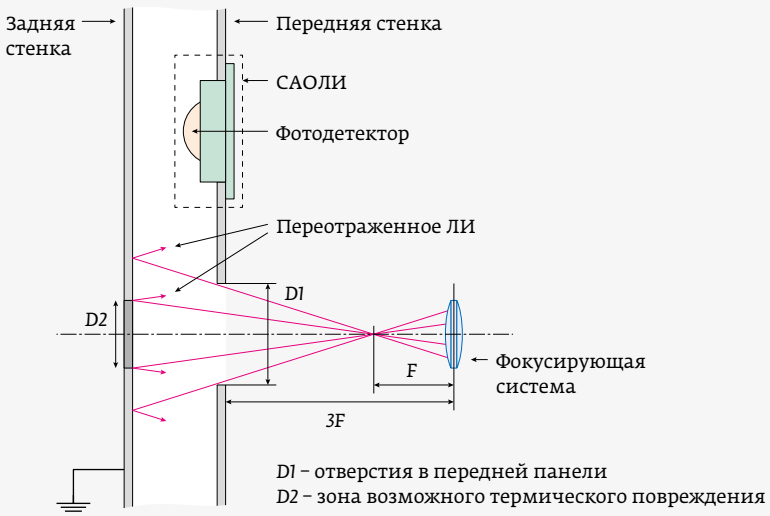

Рис. 1. *Общая схема САОЛИ в модуле защитного ограждения*
Fig. 1. *General scheme of LREPS in the safety barrier module*

Критерием положительного результата испытаний является отсутствие сквозного отверстия в задней стенке панели САОЛИ. Дополнительно проводилась оценка результатов влияния термического воздействия ЛИ на материал задней стенки с помощью оптического микроскопа Olimpus GX. Результаты испытаний оформлялись в виде протокола испытаний.

В результате исследований и экспериментов установлено, что САОЛИ с высокой степенью надежности выполняет экстренное отключение лазерного генератора от сетевого питания за заданный минималь-

Таблица 1. Основные режимы эксперимента
Table 1. Basic experiment modes

Фокусное расстояние Focal length	Мощность излучения, кВт Radiation power, kW
F	5,0
3F	
5F	

Примечание:
1. Допускается выбирать мощность излучения и фокусное расстояние в зависимости от конкретных условий испытаний.
2. Минимально допустимым расстоянием от САОЛИ до зоны воздействия ЛИ является крышка САОЛИ.

Note:
1. It is allowed to select the radiation power and focal length depending on the specific test conditions.
2. The minimum permissible distance from LREPS to the zone of influence of LR is the LREPS cover.

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

Reflected and diffusely scattered laser radiation is capable of penetrating into the space outside the PC through gaps, slots between posts, panels and other elements of it, which significantly reduces the level of protective properties of the cabin. Therefore, at the second stage of the methodology, along with evaluating the effectiveness of the "actuation" of active protection in the form of a LREPS, we studied the features of the impact of LR (direct and reflected) on the metal structural elements of the cabin to assess the degree of influence of thermal effects from LR on the stressed state of the metal structure of the protective door during a given estimated time of operation of the gearbox [12] .The specified assessment is necessary, first of all, to determine the indicators of the stress state, in order to exclude the impact of mechanical and thermal factors that cause the occurrence of residual deformations in the form of "leash", "warping" and other macro- and micro-dimensional distortions and imperfections, reducing the effectiveness of the protective (operational) properties of individual assembly elements and the cabin as a whole. An increase in the level of stress 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 defects that significantly reduce the protective properties of the cabin [13–17].

To determine the stress state of the elements and MCAP as a whole, modern methods of non-destructive magne-

ный промежуток времени и обеспечивает эффективность применения МКАЗ на серийных комплексах лазерной обработки.

Отраженное и диффузно-рассеянное лазерное излучение способно проникать в пространство вне ЗК через зазоры, щели между стойками, панелями и др. ее элементами, что существенно снижает уровень защитных свойств кабины. Поэтому на втором этапе методики (наряду с оценкой эффективности срабатывания активной защиты в виде САОЛИ) проводили исследования особенностей воздействия ЛИ (прямого и отраженного) на металлические конструктивные элементы кабины, чтобы оценить степень влияния тепловых эффектов от ЛИ на напряженное состояние металлоконструкции защитной двери кабины на протяжении заданного расчетного времени эксплуатации ЗК [12]. Указанная оценка необходима прежде всего для определения показателей напряженного состояния. Ее цель – исключить воздействие механических и тепловых факторов, вызывающих возникновение остаточных деформаций в виде «поводок», «коробления» и др. макро- и микро размерных искажений и несовершенств, снижающих эффективность защитных (эксплуатационных) свойств отдельных сборочных элементов и кабины в целом. Увеличение уровня напряжений в металлоконструкции панелей кабины способствует возникновению искажений формы и потери размеров, образованию зазоров, щелей и др. дефектов, существенно снижающих защитные свойства кабины [13–17].

Для определения напряженного состояния элементов и МКАЗ в целом использовались современные методы неразрушающего магнитометрического контроля, металлографического и структурного анализа, статистической обработки данных, совместно с механическими испытаниями, измерением твердости и др. [18–21]. Химический состав металла панелей МКАЗ определялся оптико-эмиссионным методом на анализаторе Magellan Q-8.

Для определения локализации лазерного воздействия проводились измерения значений H_c на внутренней (со стороны нахождения датчика) и наружной стороне панели на заранее размеченных участках. Значения H_c использовались в качестве первичного и достоверного информационного параметра для последующей оценки напряженного состоянии металла МКАЗ. После измерений H_c из панели отбирались образцы для дальнейших исследований металлографической структуры и напряженного состояния панелей МКАЗ. Результаты определения химического состава образцов панели представлены в табл. 2.

tometric testing, metallographic and structural analysis, statistical data processing, together with mechanical tests, hardness measurements, etc., were used [18–21]. The chemical composition of the metal of the MCAP panels was determined by the optical emission method on a Magellan Q-8 analyzer.

To determine the localization of the laser action, the Hc values were measured on the inner (from the side of the sensor) and outer sides of the panel at pre-marked areas. The Hc values were used as a primary and reliable information parameter for the subsequent assessment of the stress state of the MCAP metal. After Hc measurements, samples were taken from the panel for further studies of the metallographic structure and stress state of the MCAP panels. The results of determining the chemical composition of the panel samples are presented in table. 2.

To determine the stress state and physical and mechanical properties of the rolled metal of the protective panel, the magnetometric method of measuring the values of the coercive force was used. It is known that there is a fairly stable relationship between the chemical composition of a ferromagnetic material, its mechanical properties, stress state and coercive force (Hc) [18, 22–25]. This makes it possible to carry out preliminary calculations of Hc and use the results obtained in the future as a reliable primary information parameter of the stressed state of elements and MCAP as a whole. Based on the results of mechanical tests for static tension of samples of thin-sheet metal rolling, a calibration graph was built (Fig. 2) for the subsequent determination of the stress state of panels and other elements of MCAP.

After the experiments on the operation of the LREPS, the values of Hc were measured for the elements of the cabin (panels, racks, etc.) and using a calibration schedule (Fig. 2) the level of acting stresses from thermal loads was determined. As a result, it was found that repeated exposure to laser radiation (direct, reflected and diffusely scattered) does not change the stress state of the elements, cabin panels and MCAP as a whole, to a critical value, at which the geometric dimensions of the cabin panels may be distorted, the formation of gaps, gaps between the panels, which means a decrease in its protective properties.

As a result of the studies carried out at the first stage, it was established by calculation and experiment:

1. LREPS provides “triggering” of sensors configured for emergency disconnection of the laser generator from the mains supply for a specified minimum period of time;
2. The thermal effect of LR on the structure, physical and mechanical properties of the metal and the

Таблица 2. Средние результаты определения химического состава образцов панели
Table 2. Average 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 08Ю	<0,07	<0,03	<0,03	–	–	–	0,02–0,07	<0,025	<0,02

Примечание: 1. В таблице представлены средние данные 3–5 измерений.
2. Химический состав образцов соответствует стали 08Ю (ГОСТ 9045)

Note: 1. The table shows the average data of 3–5 measurements.
2. The chemical composition of the samples corresponds to steel 08Yu (GOST 9045)

Для определения напряженного состояния и физико-механических свойств металлопроката защитной панели использовался магнитометрический метод измерения значений коэрцитивной силы. Известно, что между химическим составом ферромагнитного материала, его механическими свойствами, напряженным состоянием и коэрцитивной силой (H_c) существует достаточно устойчивая взаимосвязь [18,22–25]. Это позволяет провести предварительные расчеты H_c и использовать полученные результаты в дальнейшем в качестве достоверного первичного информационного параметра напряженного состояния элементов и МКАЗ в целом. По результатам механических испытаний на статическое растяжение образцов тонколистового металлопроката строился тарировочный график (рис. 2) для последующего определения напряженного состояния панелей и др. элементов МКАЗ.

После экспериментов по срабатыванию САОЛИ проводились измерения значений H_c элементов кабины (панелей, стоек и др.) и при помощи тарировочного графика (рис. 2) определялся уровень действующих напряжений от тепловых нагрузок. В результате установлено, что многократное воздей-

stressed state of the investigated element of the protective cabin with the installed sensor sensitive to the LR effect 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.

This testifies to the high functional reliability of the MCAP.

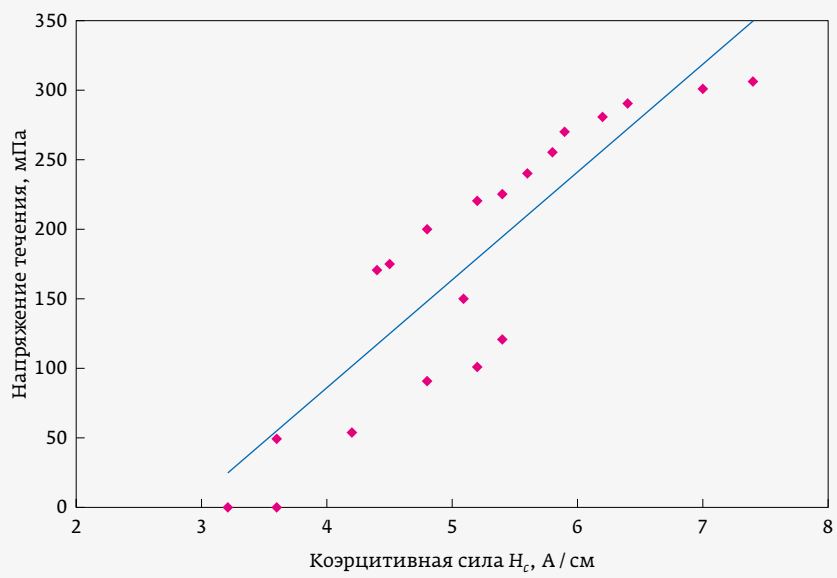

Рис. 2. *Номограмма (тарировочный график) для контроля напряженного состояния по экспериментальным значениям H_c элементов МКАЗ из стали 08Ю: (ромбы – данные эксперимента; прямая – линейная аппроксимация)*
Fig. 2. *Nomogram (calibration schedule) for stress state control according to experimental values of H_c of MCAP elements made of 08Ю steel: diamonds – experimental data; straight line – linear approximation*

ствие лазерного излучения (прямое, отраженное и диффузно-рассеянное) не изменяет напряженное состояние элементов, панелей кабины и МКАЗ в целом до критического значения, при котором возможно искажение геометрических размеров панелей кабины, образование щелей, просветов между панелями. А это означает, что воздействие не снижает ее защитных свойств.

В результате выполненных на первом этапе исследований расчетно-экспериментальным путем установлено:

1. САОЛИ обеспечивает «срабатывание» датчиков, настроенных на экстренное отключение лазерного генератора от сетевого питания за заданный минимальный промежуток времени;
2. 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.

Это свидетельствует о высокой функциональной надежности МКАЗ.

ОЦЕНКА ЭФФЕКТИВНОСТИ МОДУЛЬНОЙ КАБИНЫ С АКТИВНОЙ ЗАЩИТОЙ ОТ ОТРАЖЕННОГО И РАССЕЯННОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Любой лазерный технологический процесс сопровождается сопутствующими факторами, возникающими в результате взаимодействия ЛИ с материалом, например отраженное и диффузно-рассеянное ЛИ; вторичное излучение (ВИ) от паро-плазменного факела и обрабатываемого материала; продукты взаимодействия ЛИ с обрабатываемым материалом (пары, аэрозоли) и др.

Поэтому на заключительном этапе исследований, направленных на обеспечение требований ЛБ, выполнялась оценка эффективности защиты МКАЗ от факторов, возникающих при лазерном технологическом процессе, и соответствия выполнения указанных требований. Это в свою очередь вызывает необходимость создания соответствующей нормативной базы, гармонизированной со стандартами Европейского союза, с внедрением механизмов взаимного признания результатов сертификации национальными лабораториями и сертификационными центрами. В настоящее время на территории РФ действуют межгосударственные стандарты

EVALUATION OF THE EFFICIENCY OF A MODULAR CABIN WITH ACTIVE PROTECTION AGAINST REFLECTED AND SCATTERED RADIATION

Any laser technological process is accompanied by concomitant factors arising from the interaction of LR with the material, for example, reflected and diffusely scattered LR; secondary radiation (SR) from the steam-plasma torch and the processed material; products of LR interaction with the processed material (vapors, aerosols), etc.

Therefore, at the final stage of research aimed at ensuring the requirements of the LS, the effectiveness of the protection of the MCAP from the factors arising from the laser technological process and the compliance with the fulfillment of these requirements was evaluated. This, in turn, necessitates the creation of an appropriate regulatory framework, harmonized with the standards of the European Union, with the introduction of mechanisms for the mutual recognition of certification results by national laboratories and certification centers. Currently, on the territory of the Russian Federation there are interstate standards (ie, standards in force in the CIS countries, etc.), the main object of standardization of which is LB [26–35].

In this work, a practical assessment of the protective properties of MCAP from accompanying laser and secondary radiation is carried out, which seems to be one of the important steps aimed at providing conditions for the industrial implementation of laser equipment and laser processing technologies.

Due to the lack of currently rigorous and standardized methods for measuring the irradiance of scattered and reflected LR in the process of laser processing, in practice, one has to face a number of questions and problems [36, 37]. This applies equally to not only methodological, but also metrological support of measurements [38,39]. Therefore, measurements of the scattered and reflected LR were carried out according to a program specially developed for this case. A laser dosimeter (LD) of the "LD-07" model was used as the main device (Fig. 3). The dosimeter LD-07 is included in the State Register of Measuring Instruments and is a portable device consisting of a photodetector unit (FPU) (Fig. 3–1) and a control and display unit (CUI) (Fig. 3–2). Measurement data are processed and displayed on the CUI liquid crystal display. The device provides:

- registration and accounting of background indicators (irradiance (E_b, W/cm^2), energy exposure (N_b, J/cm^2));
- registration of the highest value of the measured parameter (irradiance (E_{max}, W/cm^2), energy exposure (H_{max}, J/cm^2) LR) during the measurement cycle;

(т.е. стандарты, действующие в странах СНГ и др.), основным объектом стандартизации которых является ЛБ [26–35].

В настоящей работе выполнена практическая оценка защитных свойств МКАЗ от сопутствующего лазерного и вторичного излучения, что представляется одним из важных шагов, направленных на обеспечение условий для промышленного внедрения лазерного оборудования и технологий лазерной обработки.

В связи с отсутствием в настоящее время строгих и нормированных методик проведения измерений облученности рассеянного и отраженного ЛИ в процессе лазерной обработки на практике приходится сталкиваться с рядом вопросов и проблем [36, 37]. В равной степени это касается не только методического, но и метрологического обеспечения измерений [38, 39]. Поэтому измерения рассеянного и отраженного ЛИ выполнялись по специально разработанной для данного случая программе. В качестве основного прибора использовали лазерный дозиметр (ЛД) модели «ЛД-07» (рис. 3). Дозиметр ЛД-07 внесен в Госреестр средств измерений и является переносным прибором, состоящим из блока фотоприемников (БФП) (рис. 3–1) и блока управления и индикации (БУИ) (рис. 3–2). Данные измерений обрабатываются и высвечиваются на жидкокристаллическом дисплее БУИ. Прибор обеспечивает:

- регистрацию и учет фоновых показателей (облученности $E_ф$, Вт/см^2, энергетической экспозиции $H_ф$, Дж/см^2);
- регистрацию наибольшего значения измеряемого параметра ЛИ (облученности E_{max}, Вт/см^2), энергетической экспозиции H_{max}, Дж/см^2) за цикл измерений;
- измерение текущих значений параметров (облученности (E, Вт/см^2), энергетической экспозиции (H, Дж/см^2) ЛИ) рассеянного или отраженного лазерного излучения [39].

Измерения максимальной облученности E_{max} от ЛИ с длиной волны λ=1,07 мкм можно проводить как при использовании ФПУ1 (рис. 3–3), так и при использовании ФПУ2 (рис. 3–4) Для проведения измерений в реальных условиях эксплуатации лазерных технологических установок выбрано устройство ФПУ2.

Серия приборов типа «АРГУС» позволяет измерить энергетические характеристики излучения в диапазоне от 180 до 1100 нм, а также параметры световой среды: освещенность и яркость.

Для исследования УФ-излучения используются радиометры: АРГУС-04-1 (УФ-А 315–400 нм) (рис. 4); АРГУС-05-1 (УФ-В 280–315 нм); АРГУС-06/1

- measurement of the current values of parameters (irradiance (E, W/cm^2), energy exposure (H, J/cm^2) LR) scattered or reflected laser radiation [39].

Measurements of the maximum irradiance E_{max} from LR with a wavelength of λ=1.07 μm can be carried out both when using FPU1 (Fig. 3–3) and using FPU2 (Fig. 3–4). To carry out measurements in real operating conditions of laser technological installations, the FPU2 device was selected.

The ARGUS series of devices allows measuring the energy characteristics of radiation in the range from 180 to 1100 nm, as well as such parameters of the light environment as illumination and brightness.

Рис. 3. *Лазерный дозиметр «ЛД-07»: 1 – блок фотоприемников (БФП); 2 – блок управления и индикации (БУИ); 3 – фотоприемное устройство диапазона 1 (ФПУ1); 4 – фотоприемное устройство диапазона 2 (ФПУ2); 5 – лазерный целеуказатель; 6 – зарезервировано под фотоприемное устройство диапазона 3*

Fig. 3. *Laser dosimeter «LD-07»: 1 – photodetector unit (FDU); 2 – control and display unit (CUI); 3 – photodetector of range 1 (FPU1); 4 – photodetector of range 2 (FPU2); 5 – laser designator; 6 – reserved for range 3 photodetector*

(УФ-С 180–280 нм). Измерительные блоки приборов включают в себя ультрафиолетовые фотоприемники с устройством подачи напряжения смещения и специально разработанными светофильтрами.

Повышенную яркость света и ослепляющий эффект от паро-плазменного факела можно так же отнести к факторам, сопутствующим лазерному технологическому процессу. Для измерения освещенности и яркости используются приборы люксметр и яркомер соответственно [40].

Измерения энергетических характеристик лазерного и вторичного излучения в рамках данного исследования проводились на лазерном роботизированном комплексе № 1 лазерного Инжинирингового Центра (ИЦ). В соответствие со специально разработанной программой испытаний осуществляли:

- производственный контроль энергетических параметров отраженного и рассеянного излучения при отработке технологии лазерной сварки;
- определение точек с максимальным значением энергетических параметров.

Измеряемые в данном исследовании параметры (факторы) и их значения приведены в табл. 3.

Рис. 4. *УФ-радиометр АРГУС-04-1 для измерения энергетической освещенности в диапазоне длин волн 315–400 нм (УФ-А)*

Fig. 4. *UV radiometer ARGUS-04-1 for measuring irradiance in the wavelength range 315–400 nm (UV-A)*

Таблица 3. Измеряемые параметры и их значения
Table 3. Measured parameters and their values

Наименование Parameter	Размерность Dimension	Примечание Note
Фоновая облученность Background irradiance	Вт / см^2 W / cm^2	–
Облученность от непрерывного лазерного излучения Irradiation from continuous laser radiation		–
Максимальная облученность от непрерывного лазерного излучения Maximum exposure from continuous laser radiation		За время контроля During control
Освещенность, создаваемая естественным светом и различными источниками искусственного освещения Illumination from natural light and various artificial light sources	лк lx	В спектральном диапазоне от 0,38 до 0,80 мкм In the spectral range 0.38 to 0.80 μm
Яркость различных объектов The brightness of various objects	кд / м^2 cd / m^2	
Энергетическая освещенность ультрафиолетового (УФ) излучения Energy illumination ultraviolet (UV) radiation	Вт / м^2 W / m^2	В спектральном диапазоне от 0,315 до 0,400 мкм In the spectral range from 0.315 to 0.400 μm
		В спектральном диапазоне от 0,280 до 0,315 мкм In the spectral range from 0.280 to 0.315 μm
Экспозиционная доза Exposure dose	Дж / м^2 J / m^2	В спектральном диапазоне от 0,2 до 0,28 мкм In the spectral range 0.2 to 0.28 μm
Энергетическая освещенность инфракрасного (ИК-излучения) Infrared (IR) irradiance	Вт / м^2 W / m^2	В спектральном диапазоне от 0,75 до 1,1 мкм In the spectral range 0.75 to 1.1 μm

Таблица 4. Характеристики точек контроля
Table 4. Checkpoint characteristics

Параметр | Parameter			Примечание Note
Расстояние от точки контроля до мишени Distance from control point to target l	Расстояние от пола до точки контроля Distance from floor to control point h_1	Расстояние от поверхности обработки до пола Distance from the treatment surface to the floor h_2	
мм | mm			
1 412	1 523	880	Расположение прибора ЛД-07 Location of device LD-07
1 425	1 507		Расположение стенда датчиков Location of the sensor stand

В объеме исследования выполнено 9 серий измерений. В качестве примера в настоящей работе представлены результаты первой серии измерений. Измерения проводились при рабочей мощности излучения лазера 2500, 3000, 4000 и 5000 Вт по три эксперимента на каждый режим мощности. Линейные размеры положения точек контроля определяли лазерным дальномером PLR25. При выполнении всех экспериментов использовали индивидуальные (очки ОЗП) и коллективные (защитная кабина с активной защитой) средства защиты. Схема проведения измерений с указанием точек контроля приведена на рис. 5. Характеристики точек контроля представлены в табл. 4.

Значения предельно допустимых уровней (ПДУ) облученности от лазерного излучения в соответствии с нормативными документами (при длительности воздействия $t_{в\,нп}$ = 8,5 с) представлены в табл. 5.

Результаты измерений максимальной облученности от лазерного излучения и их сравнение с ПДУ представлены в таблице 6, показания приборов типа АРГУС представлены в табл. 7.

Из данных табл. 6–7 следует, что при работе лазерного роботизированного комплекса № 1,

To study UV radiation, radiometers are used: ARGUS-04-1 (UV-A 315–400 nm) (Fig. 4); ARGUS-05-1 (UV-B 280–315 nm); ARGUS-06/1 (UV-C 180–280 nm). The measuring units of the instruments include ultraviolet photodetectors with a bias voltage supply device and specially designed light filters.

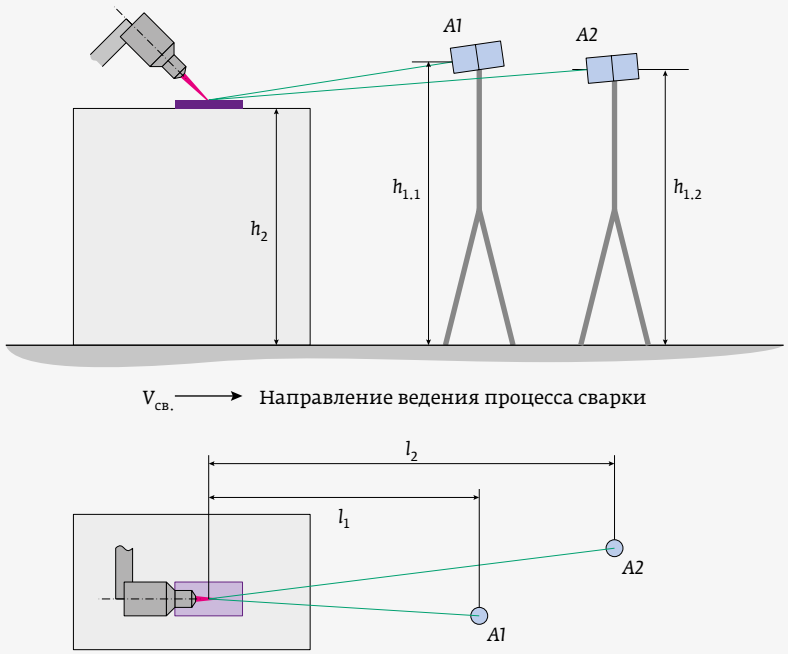

Рис. 5. *Схема проведения измерений с указанием точек контроля A1 и A2 (расстояние от точки контроля до мишени (l_1 и l_2); расстояние от пола до точки контроля (h_1); расстояние от поверхности обработки до пола (h_2)*
Fig. 5. *Measurement scheme with indication of control points A1 and A2 (distance from the control point to the target (l_1 and l_2); distance from the floor to the control point (h_1); distance from the processing surface to the floor (h_2)*

оснащенного защитной кабиной, в исследуемом диапазоне мощности (2500, 3000, 4000 и 5000 Вт) ЛИ безопасно при однократном воздействии на глаза и кожу. Однако использование средств индивидуальной защиты (очков и спецодежды) для персонала, обслуживающего лазерный комплекс, является обязательным требованием обеспечения безопасной работы на комплексе.

Таблица 5. Значения ПДУ
Table 5. Remote control values

Параметры Parameters	Значение Value	Примечание Note
Облученность при воздействии на глаза, Вт/см² Irradiation upon exposure to eyes, W/cm²	0,941	Табличное значение с учетом B^* Table value taking into account B^*
	0,320	Пересчет для входного зрачка с d_a=12 мм Conversion for the entrance pupil with d_2=12 mm
Облученность при воздействии на кожу, Вт/см² Irradiation upon exposure to skin, W/cm²	360,9	Табличное значение с учетом B^{**} Table value taking into account B^{**}
	3,033	Пересчет для входного зрачка с d_a=12 мм Conversion for the entrance pupil with d_2=12 mm

* СанПиН 1.2.3685-21 Табл. 5.18. B – вспомогательный коэффициент (СанПиН 1.2.3685-21 п. 8.2.11, табл. 5.19: B=1 при $\alpha \le \alpha_{пред}$).

** СанПиН 1.2.3685-21 Табл. 5.20.

* SanPiN 1.2.3685-21 Tab. 5.18. B – auxiliary coefficient (SanPiN 1.2.3685-21 clause 8.2.11, table. 5.19: B=1 with $\alpha \le \alpha_{limit}$).

** SanPiN 1.2.3685-21 Tab. 5.20.

Таблица 6. Результаты измерений ЛД-07
Table 6. Results of measurements LD-07

Выходная мощность, кВт Output power, kW	$E_{max} \cdot 10^{-3}$, Вт/см² W/cm²	КСОЛ* при однократном воздействии на глаза $R_г$ LRHLF* with a single exposure to the eyes R_e	КСОЛ* при однократном воздействии на кожу $R_к$ LRHLF* with a single exposure to the skin R_s
2,5	0,17	0,521	0,055
3	0,17	0,541	0,057
4	0,19	0,593	0,063
5	0,26	0,801	0,085
5	0,014	0,044	0,005
5	0,0031	0,010	0,001

* Коэффициент степени опасности лазерного излучения (КСОЛ) $R=E_{max}/E_{пду}$, при $R<1-E_{max}$ не превышает $E_{пду}$.

* Laser radiation hazard level factor (LRHLF) $R=E_{max}/E_{MPL}$, at $R<1-E_{max}$ does not exceed E_{MPL}.

The increased brightness of the light and the blinding effect of the steam-plasma torch can also be attributed to the factors accompanying the laser technological process. To measure illumination and brightness, a luxmeter and a brightness meter are used, respectively [40].

Measurements of the energy characteristics of laser and secondary radiation in the framework of this study were carried out at the laser robotic complex No. 1 of the Laser Engineering Center (EC). In accordance with a specially developed test program, the following was carried out:

- production control of the energy parameters of the reflected and scattered radiation during the development of laser welding technology;
- determination of points with the maximum value of energy parameters.

The parameters (factors) measured in this study and their values are shown in Table 3.

Within the scope of the study, 9 series of measurements were carried out. As an example, this work presents the results of the first series of measurements. The measurements were carried out at an operating laser power of 2500, 3000, 4000 and 5000 W, three experiments for each power mode. The linear dimensions of the position of the control points were determined with a PLR25 laser rangefinder. When performing all experiments, we used individual (protective absorbing goggles (OZP)) and collective (protective cabin with active protection) protective equipment. The measurement scheme with indication of control points is shown in Fig. 5. The characteristics of the control points are presented in Table 4.

The values of the maximum permissible levels (MPL) of exposure from laser radiation in accordance with regulatory documents (with a duration of exposure $t_{внп}$=8.5 s) are presented in Table 5.

The results of measurements of the maximum irradiance from laser radiation and comparison with the

Таблица 7. Результаты измерений приборами типа АРГУС
Table 7. Measurement results with ARGUS devices

Показания приборов типа АРГУС | Indications of ARGUS devices						
	-01	-02	-04	-05	-06	-15
P, кВт P, kW	Освещенность, лк Illumination, lx	Яркость, Кд/м² Brightness, Cd/m²	Энергетическая освещенность УФ-А, Вт/м² Energy lighting UV-A, W/m²	Энергетическая освещенность УФ-В, Вт/м² Energy lighting UV-B, W/m²	Экспозиционная доза УФ-С, Дж/м² Exposition UV–C dose, J/m²	Энергетическая освещенность ИК, Вт/м² Energetic illuminated IR intensity, W/m²
2,5	100	100	0,014	0,050	0	54
3	100	200	0,017	0,059	0	59
4	100	200	0,025	0,071	0	68
5	100	200	0,036	0,095	0	94

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В результате расчетно-экспериментального исследования полученных в настоящей работе данных по оценке эффективности защиты МКАЗ, оснащенных САОЛИ, а также при определении степени опасности ЛИ при работе лазерного роботизированного комплекса № 1 было установлено:

1. САОЛИ обеспечивает срабатывание датчиков, настроенных на экстренное отключение лазерного генератора от сетевого питания за заданный минимальный промежуток времени;
2. 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.
3. При работе лазерного роботизированного комплекса № 1, оснащенного защитной кабиной, в исследуемом диапазоне мощности (2500, 3000, 4000 и 5000 Вт) ЛИ безопасно при однократном воздействии на глаза и кожу.
4. Использование средств индивидуальной защиты (очков и спецодежды) для персонала, обслуживающего лазерной комплекс является обязательным требованием обеспечения безопасной работы на комплексе.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Крючина О.А., Минаев В. П.** Новый СанПиН 1.2.3685-21. Состояние отечественной нормативной базы по лазерной безопасности. *Лазер-Информ.* 2021;5–6 (692–693):7.
2. **Крючина О.А.** Современное состояние и перспективы решения практических вопросов обеспечения лазерной безопасности. URL: https://www.youtube.com/

remote control are presented in table 6, the readings of ARGUS devices are presented in Table 7.

From the data table. 6–7 it follows that when the laser robotic complex No. 1, equipped with a protective cabin, operates in the studied power range (2500, 3000, 4000 and 5000 W), LR is safe with a single exposure to the eyes and skin. However, the use of personal protective equipment (glasses and overalls) for the personnel serving the laser complex is a mandatory requirement to ensure safe work at the complex.

CONCLUSION

As a result of a computational and experimental study of the data obtained in this work on assessing the effectiveness of protection of MCAP equipped with LREPS, as well as determining the degree of danger of LR during the operation of the laser robotic complex No. 1, it was established:

1. LREPS provides “triggering” of sensors configured for emergency disconnection of the laser generator from the mains supply for a specified minimum period of time;
2. The thermal effect of LR on the structure, physical and mechanical properties of the metal and the stressed state of the investigated element of the protective cabin with the installed sensor sensitive to the LR effect 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.
3. When operating the laser robotic complex No. 1, equipped with a protective cabin in the studied power range (2500, 3000, 4000 and 5000 W), LR is safe with a single exposure to the eyes and skin.
4. The use of personal protective equipment (glasses and overalls) for personnel serving the laser complex

watch?v=-cfYKww6PX0 по ссылке.
3. *СанПиН 1.2.3685-21. Гигиенические нормативы и требования к обеспечению безопасности и (или) безвредности для человека факторов среды обитания.*
4. **Рахманов Б. Н., Кибовский В. Т.** Лазер. Все же какого он класса опасности. Часть I. *Фотоника*. 2015; 5 (53).
5. **Минаев В. П.** О стандартизации в вопросе лазерной безопасности. *Фотоника*. 2016;1 (55):114–146.
6. **Бибик О. Б., Садовников И. Э.** К вопросу о нормативной базе по лазерной безопасности. *Фотоника*. 2017;№ 1 (61):38–39.
7. **Крючина О. А., Садовников И. Э.** Гармонизация со стандартами Европейского Союза: вопросы, проблемы, решения. *Фотоника*. 2020; 14(1):56–64.
8. **Люхтер А. Б., Криворотов В.И, Скворцов К. В., Муратов Р. Ч., Зайцев Л. А.** Двухуровневая методика оценки эксплуатационной надежности модульной кабины с активной защитой (МКАЗ) от лазерного воздействия. *Вестник ВлГУ*. 2021;1:1–25.
9. **Желтов Г. И.** Нормативы по лазерной безопасности: истоки, уровень, перспективы. *Фотоника*. 2017;1 (61): 10–35.
10. **Желтов Г. И.** О нормативах по лазерной безопасности. *Лазер-Информ*. 2018; 15–16: 630–631.
11. **Рахманов Б. Н., Кибовский В. Т.** Лазерная безопасность. Документы новые – проблемы старые. *Лазер-Информ*. 2016; 21–22: 588–589.
12. **Рыкалин Н. Н.** *Расчеты тепловых процессов при сварке*. – М.: Машгиз. 1951.
13. **Копельман Л. А.** *Основы теории прочности сварных конструкций*. – СПб.: Лань, 2010. 464 с.
14. **Винокуров В. А., Григорьянц А. Г.** *Теория сварочных деформаций и напряжений*. – М.: Машиностроение, 1984. 273 с.
15. **Махненко В. И.** *Расчетные методы исследования кинетики сварочных напряжений и деформаций*. – М.: Машиностроение. 1976. 320 с.
16. **Сагалевич В. М.** *Методы устранения сварочных деформаций и напряжений*. – М.: Машиностроение. 1974. 248 с.
17. **Шиганов И. Н., Пашкевич А. И., Иванов В. В.** Поперечные деформации при лазерной, электронно-лучевой и аргонно-дуговой сварке. *Автоматическая сварка*. 1983; 11: 27–29.
18. **Бида 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.
19. **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.
20. **Дель Г. Д.** *Определение напряжений в пластической области по распределению твердости*. – М.: Машиностроение. 1971.199 с.
21. **Кроха В. А.** *Упрочнение металлов при холодной пластической деформации*. Справочник. – М.: Машиностроение. 1980. 157 с.
22. **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.
23. **Богачева Н. Д.** Расширение возможности применения метода коэрцитивной силы. *В мире неразрушающего контроля*. 2005;2(28):8–10.
24. **Попов Б. Е.** Магнитный контроль сопротивления усталости сварных соединений. *В мире неразрушающего контроля*. 2015;18(4):17–21.
25. 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)*.
26. ГОСТ Р 12.1.040-83 ССБТ. *Система стандартов безопасности труда. Лазерная безопасность. Общие положения*.
27. ГОСТ 31581-2012. *Лазерная безопасность. Общие требования безопасности при разработке и эксплуатации лазерных изделий*.
28. ГОСТ IEC 60825-4-2014. *Безопасность лазерной аппаратуры. Часть 4. Средства защиты от лазерного излучения*.
29. СТБ IEC 60825-1-2011. *Безопасность лазерных изделий. Часть 1. Классификация оборудования и требования*.
30. ГОСТ ЕН 12626-2006. *Безопасность металлообрабатывающих станков. Станки для лазерной обработки*.
31. ГОСТ Р 12.1.011-89 ССБТ. *Система стандартов безопасности труда. Средства защиты работающих. Общие требования и классификация*.
32. IEC 60825-1-2014. URL: https:.webstore.iec.ch/publication/3587.

is a mandatory requirement to ensure safe work at the complex.

REFERENCES

1. **Kryuchina O.A., Minaev V.P.** Novyj SanPiN 1.2.3685-21. Sostoyanie otechestvennoj normativnoj bazy po lazernoj bezopasnosti. *Lazer-Inform*. 2021;5–6 (692–693):7.
2. **Kryuchina O.A.** *Sovremennoe sostoyanie i perspektivy resheniya prakticheskih voprosov obespecheniya lazernoj bezopasnosti*. URL: https:.www.youtube.com/watch?v=-cfYKww6PX0 po ssylke.
3. SanPiN 1.2.3685-21. *Gigienicheskie normativy i trebovaniya k obespecheniyu bezopasnosti i (ili) bezvrednosti dlya cheloveka faktorov sredy obitaniya*.
4. **Rahmanov B. N., Kibovskij V. T.** Lazer. Vse zhe kakogo on klassa opasnosti. CHast' I. *Photonics Russia*. 2015; 5 (53).
5. **Minaev V. P.** O standartizacii v voprose lazernoj bezopasnosti. *Photonics Russia*. 2016;1 (55):114–146.
6. **Bibik O. B., Sadovnikov I. E.** K voprosu o normativnoj baze po lazernoj bezopasnosti. *Photonics Russia*. 2017;№ 1 (61):38–39.
7. **Kryuchina O. A., Sadovnikov I. E.** Garmonizaciya so standartami Evropejskogo Soyuza: voprosy, problemy, resheniya. *Photonics Russia*. 2020; 14(1):56–64.
8. **Lyuhter A. B., Krivorotov V.I, Skvorcov K. V., Muratov R. CH., Zajcev L. A.** Dvuhurovnevaya metodika ocenki ekspluatacionnoj nadyozhnosti modul'noj kabiny s aktivnoj zashchitoj (MKAZ) ot lazernogo vozdejstviya. *Vestnik VlGU*. 2021;1:1–25.
9. **ZHeltov G. I.** Normativy po lazernoj bezopasnosti: istoki, uroven', perspektivy. *Photonics Russia*. 2017;1 (61): 10–35.
10. **ZHeltov G.I.** O normativah po lazernoj bezopasnosti. *Lazer-Inform*. 2018; 15–16: 630–631.
11. **Rahmanov B. N., Kibovskij V. T.** Lazernaya bezopasnost'. Dokumenty novye – problemy starye. *Lazer-Inform*. 2016; 21–22: 588–589.
12. **Rykalin N. N.** *Raschety teplovyh processov pri svarke*. – M.: Mashgiz. 1951. 296 p.
13. **Kopel'man L. A.** *Osnovy teorii prochnosti svarnyh konstrukcij*. – SPb.: Lan', 2010. 464 p.
14. **Vinokurov V. A., Grigor'yanc A. G.** *Teoriya svarochnyh deformacij i napryazhenij*. – M.: Mashinostroenie, 1984. 273 p.
15. **Mahnenko V. I.** *Raschyotnye metody issledovaniya kinetiki svarochnyh napryazhenij i deformacij*. – M.: Mashinostroenie. 1976. 320 p.
16. **Sagalevich V. M.** *Metody ustraneniya svarochnyh deformacij i napryazhenij*. – M.: Mashinostroenie. 1974. 248 p.
17. **SHiganov I.N., Pashkevich A. I., Ivanov V. V.** Poperechnye deformacii pri lazernoj, elektronno-luchevoj i argonno-dugovoj svarke. *Avtomaticheskaya svarka*. 1983; 11: 27–29.
18. **Bida G. V.** Razmer zerna i korrelyaciya prochnostnyh, plasticheskih i vyazkih svojstv s koercitivnoj siloj ferritno-perlitnyh stalej. *Tekhnicheskaya diagnostika i nerazrushayushchij kontrol'*. 2010;4:40–45.
19. **Matyunin V. M., Terent'ev V.F., Marchenkov A.YU., Slizov A. K.** Metodika opredeleniya tvyordosti i drugih mekhanicheskih svojstv tonkolistovoj trip-stali indentirovaniem. *Zavodskaya laboratoriya. Diagnostika materialov*. 2017;83(7):49–53.
20. **Del' G. D.** *Opredelenie napryazhenij v plasticheskoj oblasti po raspredeleniyu tvyordosti*. – M.: Mashinostroenie. 1971.199 s.
21. **Kroha V. A.** *Uprochnenie metallov pri holodnoj plasticheskoj deformacii. Spravochnik*. – M.: Mashinostroenie. 1980. 157 s.
22. **Bezlyud'ko G.YA., YOlkina E.I., Karabin V. V., Popov B. E., Krivorotov V. I.** Novyj podhod k ocenke sostoyaniya svarnyh soedinenij. *Mir svarki*. 2010;15:44–49.
23. **Bogachyova N. D.** Rasshirenie vozmozhnosti primeneniya metoda koercitivnoj sily. *V mire nerazrushayushchego kontrolya*. 2005;2(28):8–10.
24. **Popov B. E.** Magnitnyj kontrol' soprotivleniya ustalosti svarnyh soedinenij. *V mire nerazrushayushchego kontrolya*. 2015;18(4):17 –21.
25. RD IKC «KRAN»-007–97/02. *Magnitnyj kontrol' napryazhenno-deformirovannogo sostoyaniya i ostatochnogo resursa podъemnyh sooruzhenij pri provedenii ih obsledovaniya i tekhnicheskom diagnostirovanii (ekspertize promyshlennoj bezopasnosti)*.
26. GOST R 12.1.040-83 SSBT. *Sistema standartov bezopasnosti truda. Lazernaya bezopasnost'. Obshchie polozheniya*.
27. GOST 31581-2012. *Lazernaya bezopasnost'. Obshchie trebovaniya bezopasnosti pri razrabotke i ekspluatacii lazernyh izdelij*.
28. GOST IEC 60825-4-2014. *Bezopasnost' lazernoj apparatury. CHast' 4. Sredstva zashchity ot lazernogo izlucheniya*.
29. STB IEC 60825-1-2011. *Bezopasnost' lazernyh izdelij. CHast' 1. Klassifikaciya oborudovaniya i trebovaniya*.
30. GOST EN 12626-2006. *Bezopasnost' metalloobrabatyvayushchih stankov. Stanki dlya lazernoj obrabotki*.
31. GOST R 12.1.011-89 SSBT. *Sistema standartov bezopasnosti truda. Sredstva zashchity rabotayushchih. Obshchie trebovaniya i klassifikaciya*.
32. *IEC 60825-1-2014*. URL: https:.webstore.iec.ch/publication/3587.

33. BS EN 60825-1: 2014. *Safety of laser products. Part 1: Equipment classification and requirements (In Russ).*
34. ANSI Z136.1-2014. *American National Standard for Safe Use of Lasers (In Russ).*
35. СТО НТО «ИРЭ-Полюс» 18003536-012-2018. *Безопасность лазерных технологических установок.*
36. **Крючина О. А., Садовников И. Э.** Проблемы проведения измерений облученности в процессе лазерной обработки металлов. *Фотоника.* 2019;13(3): 308–311.
37. **Крючина О. А., Шиганов И. Н., Садовников И. Э.** Совершенствование методики контроля отраженного и рассеяного излучния при лазерных технологических процессах.Охрана труда в машиностроении. *Технология машиностроения.* 2021;1:63–67.
38. **ГОСТ Р 12.1.031-2010. ССБТ. Лазеры.** *Методы дозиметрического контроля лазерного излучения.*
39. *Руководство по эксплуатации «Дозиметры лазерные «ЛД-07» БВЕК 710000.001 РЭ».* – М.: ООО «НТМ-Защита».
40. *Многоканальный универсальный радиометр «АРГУС».* URL: https:.www.vniiofi.ru/depart/m7/argus.html свободный.

АВТОРЫ

О. А. Крючина, oKryuchina@ntoire-polus.ru; ООО НТО «ИРЭ-Полюс», г. Фрязино, Моск. обл., Россия.
ORCID ID № 0000-0001-7592-0790

А. Б. Люхтер, 3699137@mail.ru, Владимирский государственный университет имени А.Г. и Н. Г. Столетовых, Владимир, Россия.

В. И. Криворотов, ООО НТО «ИРЭ-Полюс», vKrivorotov@ntoire-polus.ru, г. Фрязино, Моск. обл., Россия.

И. Э. Садовников, ООО НТО «ИРЭ-Полюс», iSadovnikov@ntoire-polus.ru, г. Фрязино, Моск. обл., Россия.
ORCID ID № 0000-0002-7576-6591

П. В. Безносов, ООО НТО «ИРЭ-Полюс», pbeznosov@ntoire-polus.ru, г. Фрязино, Моск. обл., Россия.

А. В. Луконин, ООО НТО «ИРЭ-Полюс», aLukonin@ntoire-polus.ru, г. Фрязино, Моск. обл., Россия.

ВКЛАД ЧЛЕНОВ АВТОРСКОГО КОЛЛЕКТИВА

Статья подготовлена на основе многолетней работы всех членов авторского коллектива.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что у них нет конфликта интересов. Все авторы приняли участие в написании статьи и дополнили рукопись в части своей работы.

33. BS EN 60825-1: 2014. *Safety of laser products. Part 1: Equipment classification and requirements (In Russ).*
34. ANSI Z136.1-2014. *American National Standard for Safe Use of Lasers (In Russ).*
35. STO NTO «IRE-Polyus» 18003536-012-2018. *Bezopasnost' lazernyh tekhnologicheskih ustanovok.*
36. **Kryuchina O. A., Sadovnikov I. E.** Problemy provedeniya izmerenij obluchyonnosti v processe lazernoj obrabotki metallov. *Photonics Russia.* 2019;13(3): 308–311.
37. **Kryuchina O. A., SHiganov I.N., Sadovnikov I. E.** Sovershenstvovanie metodiki kontrolya otrazhyonnogo i rasseyanogo izluchniya pri lazernyh tekhnologicheskih processah. Ohrana truda v mashinostroenii. *Tekhnologiya mashinostroeniya.* 2021;1:63–67.
38. GOST R 12.1.031-2010. SSBT. *Lazery. Metody dozimetricheskogo kontrolya lazernogo izlucheniya.*
39. *Rukovodstvo po ekspluatacii «Dozimetry lazernye «LD-07» BVEK 710000.001 RE».* – M.: OOO «NTM-Zashchita».
40. *Mnogokanal'nyj universal'nyj radiometr «ARGUS».* URL: https:.www.vniiofi.ru/depart/m7/argus.html svobodnyj.

ABOUT AUTHORS

O. A. Kryuchina, NTO IRE-Polyus LLC, oKryuchina@ntoire-polus.ru, Fryazino, Moscow region, Russia.
ORCID ID No. 0000-0001-7592-0790

A. B. Lyukhter, Vladimir State University named after Alexander and Nikolay Stoletovs, 3699137@mail.ru, Vladimir, Russia

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

I. E. Sadovnikov, NTO IRE-Polyus LLC, iSadovnikov@ntoire-polus.ru, Fryazino, Moscow region, Russia.
ORCID ID No. 0000-0002-7576-6591

P. V. Beznosov, NTO IRE-Polyus LLC, pbeznosov@ntoire-polus.ru, Fryazino, Moscow region, Russia.

A. V. Lukonin, NTO IRE-Polyus LLC, aLukonin@ntoire-polus.ru, Fryazino, Moscow region, Russia.

CONTRIBUTION BY THE MEMBERS OF THE TEAM OF AUTHORS

The article was prepared on the basis of many years of work by all members of the team of authors.

CONFLICT OF INTEREST

The authors claim that they have no conflict of interest. All authors took part in writing the article and supplemented the manuscript in part of their work.