



Исследование процесса лазерной очистки металлопроката от окалины

Д. В. Журба^{1,2}, В. М. Журба², В. П. Вейко¹, А. Э. Пуйша²

¹ Университет ИТМО, Санкт-Петербург, Россия

² ООО «НПП ВОЛО», Санкт-Петербург, Россия

В статье представлены результаты исследования процесса лазерной очистки металлопроката в режимах воздействия, не приводящих к нагреву окалины выше температуры ее плавления. Выявлена и обоснована возможность разрушения прокатной окалины за счет термохимических реакций в окалине и последующего термомеханического разрушения. Проведен поиск и оптимизация режимов лазерного воздействия для увеличения эффективности очистки. Для более полного описания процесса лазерной очистки уделено внимание структуре прокатной окалины и описаны особенности ее формирования и вероятные фазовые превращения под действием лазерного нагрева. Экспериментально обнаружена приводящая к термомеханическому разрушению окалины область режимов лазерной обработки в диапазоне длительностей воздействия 30–400 мкс и плотностей мощности 50–750 кВт/см². Процесс лазерной очистки от окалины за счет термомеханического разрушения реализован с использованием непрерывного волоконного иттербиевого лазера с максимальной мощностью 2 кВт.

Ключевые слова: лазерная очистка, непрерывный иттербиевый волоконный лазер, микросекундная длительность воздействия, прокатная окалина, термомеханическое разрушение окалины

Статья поступила: 23.05.2024

Статья принята: 01.07.2024

Investigation of the Process of Laser Descaling of Mill Metal

D. V. Zhurba^{1,2}, V. M. Zhurba², V. P. Veiko¹, A. E. Puisha²

¹ ITMO University

² NPP VOLO LLC

The article investigates the process of laser cleaning of mill metal in exposure modes that do not lead to heating of the scale above its melting point. The possibility of destruction of mill scale due to thermochemical reactions in the scale and subsequent thermomechanical destruction has been identified and substantiated. The search and optimization of laser exposure modes has been carried out to increase the cleaning efficiency. For a more complete description of the laser cleaning process, attention is paid to the structure of mill scale; the features of its formation and probable phase transformations under the action of laser heating are described. An area of laser treatment modes in the range of exposure durations from 30 to 400 μ s and power densities of from 50 to 750 kW/cm² leading to thermomechanical scale destruction has been experimentally discovered. The process of laser descaling due to thermomechanical destruction is implemented using a continuous-wave fiber ytterbium laser with a maximum power of 2 kW.

Key words: Laser cleaning, continuous-wave ytterbium fiber laser, microsecond exposure time, mill scale, thermomechanical scale destruction

Article received: 23.05.2024

Article accepted: 01.07.2024

INTRODUCTION

The removal of oxide layers from the surface of metals is a pressing challenge for the metalworking industry. The most demanded and, at the same time, the most difficult task here is the removal of oxide layers from the surface of hot-mill carbon steels (mill scale). Mill scale does not protect steel from corrosion, and in some cases leads to an acceleration of corrosion processes, which reduces the service life of mill metal

ВВЕДЕНИЕ

Удаление оксидных слоев с поверхности металлов – актуальная проблема для металлообрабатывающей промышленности. Наиболее востребованной и в то же время наиболее сложной задачей здесь является удаление оксидных слоев с поверхности горячекатаных углеродистых сталей (прокатной окалины). Прокатная окалина не защищает сталь от коррозии, а в ряде случаев приводит к ускорению коррозионных процессов, что сокращает срок службы изделий из металлопроката [1–4], поэтому поверхность стали во всех случаях требуется от нее очищать.

К настоящему времени наиболее распространены различные способы механической или химической очистки металлических поверхностей от окалины. К механическим методам очистки относятся дробеструйная и пескоструйная обработки, шлифование абразивными щетками и другие. К химическим относятся травление в соляно-кислотных, сернокислых и азотнокислых ваннах или в щелочах, в том числе с применением электролиза [5].

Существенными недостатками данных способов являются: недостаточная степень очистки, повреждение поверхности металла, а также негативное влияние на персонал и окружающую среду, связанное с использованием опасных расходных материалов, реактивов, образованием побочных продуктов (песчаной пыли и пыли окалины, паров кислот, отработанных травильных растворов, загрязненного шлама и др.), которые необходимо утилизировать. В связи с необходимостью улучшения условий труда и безопасности для окружающей среды производств на данные способы накладываются серьезные ограничения.

Все более широкое применение для удаления различных загрязнений, в частности оксидных слоев с поверхности металлов, находят лазерные источники. Лазерная очистка уже зарекомендовала себя как безопасный для окружающей среды и удобный в использовании способ удаления загрязнений, отличающийся бесконтактностью, отсутствием расходных материалов и инструментов, низкими эксплуатационными затратами, принципиальной возможностью удалять любые типы загрязнений и рядом других преимуществ, связанных с применением лазерного излучения с высокой плотностью мощности [6–12].

В последнее десятилетие наибольшее распространение получила технология лазерной очистки, основанная на испарении материала загрязнения наносекундными импульсами с высокой

products [1–4], therefore, the surface of steel in all cases needs to be cleaned from it.

By now, various methods of mechanical or chemical descaling of metal surfaces are most common. Mechanical cleaning methods include shot blasting and sandblasting, grinding with abrasive brushes and others. Chemical methods include pickling in hydrochloric acid, sulfuric acid and nitric acid baths or in alkalis, including using electrolysis [5].

The significant disadvantages of these methods are: insufficient degree of cleaning, damage to the metal surface, as well as a negative impact on personnel and the environment associated with the use of hazardous consumables, reagents, the formation of by-products (sand dust and scale dust, acid vapors, waste pickle liquor, contaminated sludge, etc.), which must be disposed of. Due to the need to improve working conditions and environmental safety of production facilities, serious restrictions are imposed on these methods.

Laser sources are increasingly being used to remove various contaminants, in particular oxide layers from the surface of metals. Laser cleaning has already established itself as an environmentally safe and easy-to-use method for scale removals, characterized by its being contactless, no need for consumables and tools, low operating costs, the fundamental ability to remove any types of impurities and a number of other advantages associated with the use of laser radiation with high power density [6–12].

In the last decade, laser cleaning technology based on evaporation of impurity material by nanosecond pulses with high power density ($>10^7$ W/cm²) has become the most widespread. The use of ytterbium pulsed 100–200 ns fiber laser sources is justified by the versatility of their use: an acutely focused laser pulse makes it possible to remove almost any impurities from the surface of most materials [6–9, 13–15]. The short pulse duration also minimizes the impact on the base material; in metals, the zone of thermal exposure and reflow is limited to a few microns. However, evaporation of oxide layers and, especially, scale is a very energy-intensive process. Therefore, pulsed laser removal of mill scale from the surface of hot-mill steel is characterized by low productivity [13, 14].

The use of a continuous laser makes it possible to vary processing parameters such as exposure time, power density and energy in wide ranges. Therefore, it seems promising to investigate and implement various descaling mechanisms, including those not related to evaporation, using continuous lasers. Cleaning of mill metal by continuous laser radiation due to evaporation is difficult to implement in

плотностью мощности ($>10^7$ Вт/см²). Применение иттербиевых импульсных 100–200 нс волоконных лазерных источников оправдывается универсальностью их использования: остросфокусированный лазерный импульс позволяет удалить практически любое загрязнение с поверхности большинства материалов [6–9, 13–15]. Короткая длительность импульса также позволяет минимизировать воздействие на основной материал, в металлах зона термического воздействия и оплавления ограничивается единицами микрон. Однако испарение оксидных слоев и особенно окалины – весьма энергоемкий процесс. Поэтому импульсная лазерная очистка прокатной окалины с поверхности горячекатаной стали характеризуется низкой производительностью [13, 14].

Использование непрерывного лазера позволяет варьировать такие параметры обработки, как длительность воздействия, плотность мощности и энергии в широких диапазонах. Поэтому представляется перспективным исследовать и реализовывать различные механизмы удаления загрязнений, в том числе не связанные испарением, с помощью непрерывных лазеров. Очистка металлопроката излучением непрерывных лазеров за счет испарения на практике трудно реализуема. Нагрев тонкого слоя окалины до температуры кипения также приводит к значительному нагреву стали. В результате поверхность стали оплавляется, и на ней формируется новый слой окалины [16]. Столь сильный нагрев приведет не только к повреждению поверхности, но и к значительным термическим деформациям всего изделия. Поэтому для производительной лазерной очистки металлопроката (и конструкций из него) от окалины необходимо искать более эффективные механизмы разрушения и удаления окалины, не требующие высокотемпературного нагрева. В этом направлении наиболее перспективно исследование механизмов разрушения окалины за счет термических напряжений. Преимущества лазерного источника тепла очевидны: высокая плотность мощности позволяет в течение нескольких десятков микросекунд нагреть слой окалины на всю толщину, а в отсутствие излучения практически также быстро охладить ее за счет теплопроводности и отвода тепла в металлическую основу.

В данной работе обосновывается возможность удаления прокатной окалины за счет термомеханического разрушения при ее нагреве излучением непрерывного волоконного иттербиевого лазера и осуществляется поиск и оптимизация режимов

practice. Heating a thin layer of scale to the boiling point also leads to significant heating of the steel. As a result, the surface of the steel is melted and a new layer of scale is formed on it [16]. Such strong heating will lead not only to damage to the surface, but also to significant thermal deformations of the entire article. Therefore, for productive laser descaling of mill metal (and structures made of it), it is necessary to look for more effective mechanisms of destruction and removal of scale that do not require high-temperature heating. In this direction, the most promising is the study of the mechanisms of scale destruction due to thermal stresses. The advantages of a laser heat source are obvious: the high power density allows to heat the entire thickness of the scale layer within several tens of microseconds, and in the absence of radiation, to cool it almost as fast due to thermal conductivity and heat dissipation into the metal base.

This paper proves the possibility of removing mill scale due to thermomechanical destruction when heated by radiation of a continuous-wave fiber ytterbium laser and carries out the search and optimization of exposure modes that cause thermomechanical destruction of mill scale on a thin-sheet St3sp mill carbon steel. The heating temperature of the scale in this process does not exceed its melting temperature, and the destruction and removal of scale fragments occurs in the solid phase state due to tensile thermal stresses and a decrease in adhesion during the formation of wustite. Heating to the temperature of scale destruction occurs only in its own layer. The surface of the steel does not undergo significant thermal effects. Laser scale destruction due to thermal stresses is a less energy-consuming process than laser evaporation.

STRUCTURE AND PROCESS OF MILL SCALE FORMATION

Scale on the surface of steels is an oxide layer (black, bluish or dark red) formed as a result of heat treatment of steels in an oxidizing atmosphere, for example during mill. Normally, at a steel heating temperature above 570 °C, the scale consists of wustite (FeO), magnetite (Fe₃O₄) and hematite (Fe₂O₃) [17, 18]. Mill (or air) scale is formed on the surface of steels at the final stage of mill, when cooled after the last mill stand. The final form and composition of the mill scale depends on the temperature at the end of mill and the temperature of winding into rolls, the cooling rate before winding and the roll cooling rate, the composition of the atmosphere, the presence of water vapor and many other factors [1, 18–21].

Oxides are formed on iron, the specific volume of which oxides is greater than the volume of the metal,

воздействия, вызывающих термомеханическое разрушение прокатной окалины на тонколистовом прокате углеродистой стали ст3сп. Температура нагрева окалины в этом процессе не превышает температуры ее плавления, а разрушение и удаление фрагментов окалины происходит в твердом фазовом состоянии за счет растягивающих термических напряжений и уменьшения адгезии при формировании вюстита. Нагрев до температуры разрушения окалины происходит лишь в ее собственном слое. Поверхность стали не претерпевает существенного термического влияния. Лазерное разрушение окалины за счет термонапряжений является менее энергозатратным процессом, чем лазерное испарение.

СТРУКТУРА И ПРОЦЕСС ФОРМИРОВАНИЯ ПРОКАТНОЙ ОКАЛИНЫ

Окалина на поверхности сталей – оксидный слой (черного, сизого или темно-красного цвета) формируется в результате термической обработки сталей в окислительной атмосфере, например при прокатке. В общем случае при температуре нагрева стали выше 570 °C окалина состоит из вюстита (FeO), магнетита (Fe_3O_4) и гематита (Fe_2O_3) [17, 18]. Прокатная (или воздушная) окалина образуется на поверхности сталей на заключительной стадии получения проката, при охлаждении после последней клетки прокатного стана. Конечный вид и состав прокатной окалины зависит от температуры в конце прокатки и температуры смотки в рулоны, скорости охлаждения перед смоткой и скорости охлаждения рулона, состава атмосферы, наличия водяных паров и множества других факторов [1, 18–21].

На железе образуются оксиды, удельный объем которых больше объема металла, поэтому окалина является пористой и хрупкой. Окалина может состоять из различных оксидных слоев, которые различаются теплофизическими свойствами. При высокотемпературном нагреве в печах на стали формируется трехслойная окалина, нижним слоем которой является вюстит [22]. При высокой температуре вюстит становится пластичным. При температурах выше 1250 °C сопротивление сдвигу в слое вюстита становится близким к нулю. Поэтому при высокой температуре характерна уменьшенная величина адгезии окалины к поверхности металла [19]. Различия коэффициентов теплового расширения слоев окалины и металла, а также снижение адгезии при формировании вюститного слоя являются предпосылками для разрушения окалины при нагреве и быстром охлаждении.

so the scale is porous and brittle. Scale can consist of various oxide layers, which differ in thermophysical properties. During high-temperature heating in furnaces, a three-layer scale is formed on steel, the lower layer of which is wustite [22]. At high temperatures, the wustite becomes plastic. At temperatures above 1250 °C, the shear resistance in the wustite layer becomes close to zero. Therefore, at high temperatures, a reduced amount of scale adhesion to the metal surface is characteristic [19]. Differences in the coefficients of thermal expansion of the scale and metal layers, as well as a decrease in adhesion during the formation of a wustite layer, are prerequisites for the destruction of scale during heating and rapid cooling.

This effect is successfully used in mill production in the hydraulic removal of furnace scale, which has a classic three-layer structure. However, the hydraulic descaling works well with scale thicknesses of more than 1 mm and with high-temperature heating of the entire workpiece. In this case, the jet of water effectively cools the scale layer, while the base metal remains hot. Due to the shear stresses arising in the scale layer, as well as the additional kinetic energy of the water jet, the scale crust is destroyed and detached [23].

Unlike furnace scale, which is formed at a constant high temperature and consists mainly of wustite and a thin upper layer of magnetite, mill scale is formed on a finished roll at a constantly decreasing temperature. The temperature at the end of the mill process (at the exit from the finishing stand of the mill) is usually below 900 °C. The sheets are quickly cooled to the winding temperature and wound into rolls, which are left to cool in the air. Air access to the surface of the mill sheet is limited, and the oxidation of steel slows down. Due to the shorter time of high-temperature oxidation, the thickness of the formed mill scale does not exceed several tens of microns. Prolonged cooling of mill products with mill scale at temperatures above 570 °C leads to the formation of a scale consisting mainly of magnetite, at temperatures below 570 °C – in the scale, the initial wustite decomposes by eutectoid reaction to magnetite and metallic iron. If the winding of the sheets takes place at a lower temperature, and the cooling of the rolls occurs quickly enough, then a large amount of wustite is stored in the mill scale and such scale is easier to remove. However, as a rule, the cooling of the rolls is slow and the main component in the scale is magnetite or the product of the eutectoid decomposition reaction of wustite [20, 21, 24–28]. The scheme of formation of various types of mill scale is shown in Fig. 1. A thin film of mill scale turns out to be more homogeneous in its properties and more plastic than classical furnace scale. Such scale has no

Данный эффект с успехом используется на прокатном производстве при гидросбиве печной окалины, имеющей классическую трехслойную структуру. Однако гидросбив хорошо работает при толщинах окалины более 1 мм и при высокотемпературном нагреве всей заготовки. В данном случае струя воды эффективно охлаждает слой окалины, тогда как основной металл остается горячим. За счет возникающих в слое окалины напряжений среза, а также дополнительной кинетической энергии струи воды происходит разрушение и отрыв корки окалины [23].

В отличие от печной окалины, формирующейся при постоянной высокой температуре и состоящей в основном из вюстита и тонкого верхнего слоя магнетита, прокатная окалина формируется на готовом прокате при постоянно снижающейся температуре. Температура в конце процесса проката (на выходе из чистовой клетки проката) обычно ниже 900 °С. Листы быстро охлаждают до температуры смотки и сматывают в рулоны, которые оставляют остывать на воздухе. Доступ воздуха к поверхности сматанного в рулон листа ограничен, и окисление стали замедляется. За счет меньшего времени высокотемпературного окисления толщина формирующейся прокатной окалины не превышает нескольких десятков микрон. Длительное остывание проката с прокатной окалиной при температурах выше 570 °С приводит к формированию окалины, состоящей в основном из магнетита, при температурах ниже 570 °С – в окалине исходный вюстит распадается по эвтектоидной реакции на магнетит и металлическое железо. Если смотка листов происходит при более низкой температуре, а охлаждение рулонов происходит достаточно быстро, то в прокатной окалине сохраняется большое количество вюстита и такая окалина легче удаляется. Однако, как правило, охлаждение рулонов происходит медленно и в окалине основной составляющей является магнетит или продукт эвтектоидной реакции распада вюстита [20, 21, 24–28]. Схема формирования различных видов прокатной окалины показана на рис. 1. Тонкая пленка прокатной окалины получается более однородной по своим свойствам и более пластичной, чем классическая печная окалина. Такая окалина не имеет выраженной слоистости, обладает высокой адгезией со сталью и хорошо сопротивляется механическому воздействию [23].

Чтобы реализовать механизмы разрушения прокатной окалины за счет внутренних напряжений, необходимо увеличить интенсивность

pronounced layering, has high adhesion to steel and resists well mechanical action [23].

In order to implement the mechanisms of destruction of mill scale due to internal stresses, it is necessary to increase the intensity of heating and cooling. It is known that when surface heating of steel with mill scale by high frequency currents and additional mechanical action (blows of piezoceramic microvibrators), its destruction occurs and a cleaning effect is achieved. An increase in the plasticity of the wustite during heating contributes to the destruction of scale with additional mechanical action [29]. However, the intensity of heating and cooling when using induction heating is not sufficient for effective cleaning. Also, this method is not suitable for cleaning thin-sheet mill products due to significant overheating of the steel sheet and its warping.

Taking into account the structure of the scale and the process of its formation, it was concluded that it is necessary to study the mechanisms of destruction and removal of scale due to intensive local laser heating of it to the full depth and subsequent cooling due to thermal conductivity. As a result of heating the scale above 570 °C, wustite is formed from a mechanical mixture of magnetite and metallic iron. During cooling at temperatures below 570 °C, wustite decomposes again into magnetite and metallic iron. High temperature gradients during cyclic heating and cooling and various linear expansion coefficients of the scale and steel phases form stresses in the scale layer [29, 30]. As a result, the combination of physico-chemical and thermomechanical mechanisms during laser heating makes it possible to destroy and remove the initial layer of scale. Since the heating temperature of the steel surface is significantly lower than its melting point, it does not damage and oxidize [31].

DESCRIPTION OF SAMPLES

The study of the mill scale cleaning process was carried out on samples of hot-mill products with a thickness of 5 mm of the St3sp steel grade containing from 0.14% to 0.22% carbon. Steel of this grade is widely used in industry. The surface of the sheets in the delivery state is covered with a uniform thin scale of dark blue color without defects visible to the unaided eye. Before laser cleaning, the surface of the samples was not subjected to preliminary preparation. The thickness of the scale was measured on the transverse section of the sheet using an optical microscope. As seen on the micrograph (Fig. 2), the thickness of the scale is about 15–20 microns.

The micrograph also shows oxidized areas of steel under the main dark layer of scale. The formation

нагрева и охлаждения. Известно, что при поверхностном нагреве стали с прокатной окалиной токами высокой частоты и дополнительном механическом воздействии (ударами пьезокерамических микровибраторов) происходит ее разрушение и достигается эффект очистки. Увеличение пластичности вюстита при нагреве способствует разрушению окалины при дополнительном механическом воздействии [29]. Однако интенсивности нагрева и охлаждения при использовании индукционного нагрева недостаточно для эффективной очистки. Также данный способ не подходит для очистки тонколистового проката из-за существенного перегрева листа стали и его коробления.

Учитывая структуру окалины и процесс ее формирования, был сделан вывод о необходимости исследования механизмов разрушения и удаления окалины за счет интенсивного локального лазерного нагрева ее на всю глубину и последующего охлаждения за счет теплопроводности. В результате нагрева окалины свыше 570 °C из механической смеси магнетита и металлического железа формируется вюстит. Во время охлаждения при температуре ниже 570 °C вюстит вновь распадается на магнетит и металлическое железо. Высокие градиенты температур при циклическом нагреве и охлаждении и различные линейные коэффициенты расширения фаз окалины и стали формируют напряжения в слое окалины [29, 30]. В результате совокупность физико-химических и термомеханических механизмов при лазерном нагреве позволяет разрушить и удалить исходный слой окалины. Так как температура нагрева поверхности стали существенно ниже температуры ее плавления, то при этом не происходит ее повреждения и окисления [31].

ОПИСАНИЕ ОБРАЗЦОВ

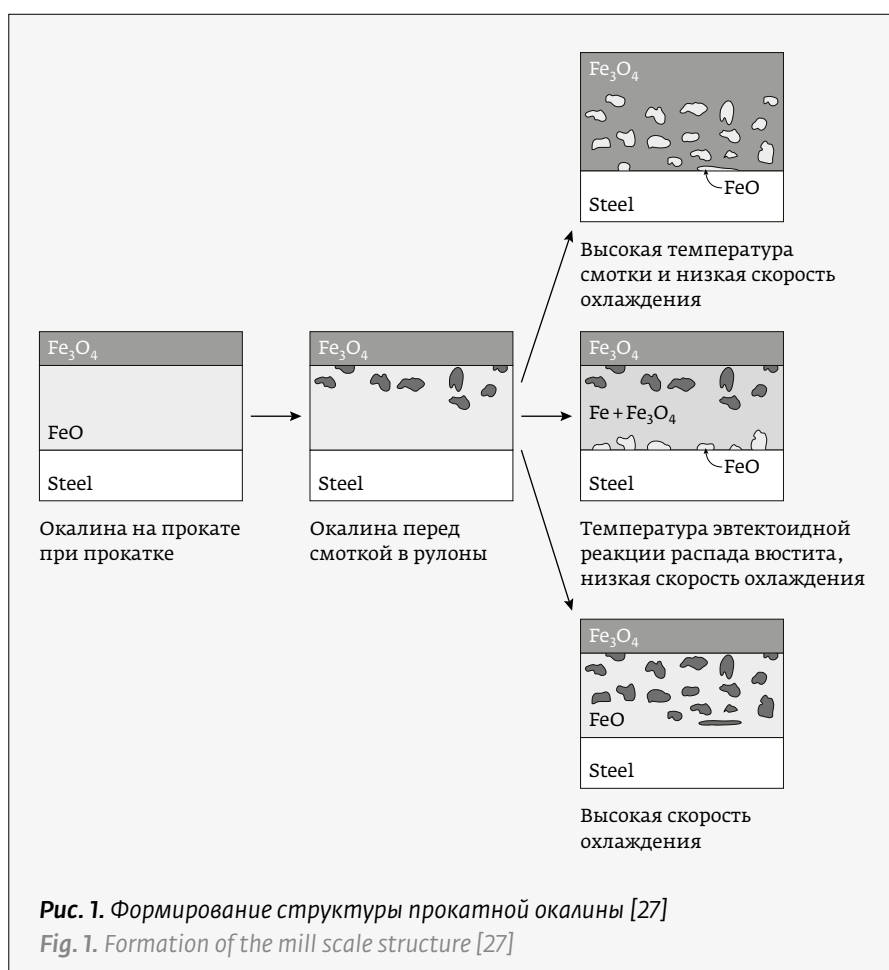
Исследование процесса очистки прокатной окалины выполнялось на образцах горячекатаного проката толщиной 5 мм марки стали СтЗсп, содержащей

of these areas is probably associated with defects of mill [32] or with the internal oxidation of steel and the formation of an intra-oxidized transition layer at the steel-scale boundary [33].

CONTINUOUS-WAVE LASER SCALE TREATMENT SCHEMES

The study used a continuous-wave fiber ytterbium laser YLR-2000-MM-WC with a wavelength of $\lambda=1.06 \mu\text{m}$ with a power of 2 kW. Two different optical scanning systems were used: circular and linear (Figure 3). The circle or line obtained with the help of appropriate optical scanning systems was moved rectilinearly to form a continuous processing area. The considered method of scanning the metal surface with a linearly moving circle to perform cleaning was proposed in the patent [34].

The main variable parameters of the exposure were the power density, duration of exposure and the overlap coefficient of the scan figures. The power density and duration of exposure depend on the parameters of the scanning systems: the diameter of the fiber,



от 0,14% до 0,22% углерода. Сталь данной марки широко применяется в промышленности. Поверхность листов в состоянии поставки покрыта равномерной тонкой окалиной темно-синего цвета без видимых невооруженным глазом дефектов проката. Перед лазерной очисткой поверхность образцов не подвергалась предварительной подготовке. Измерение толщины окалины выполнено на поперечном шлифе листа с помощью оптического микроскопа. Как видно на микрофотографии (рис. 2), толщина окалины составляет около 15–20 мкм.

На микрофотографии также видны окисленные области стали под основным темным слоем окалины. Образование данных областей, вероятно, связано с дефектами проката [32] или с внутренним окислением стали и формированием внутреокисленного переходного слоя на границе сталь-окалина [33].

СХЕМЫ ОБРАБОТКИ ОКАЛИНЫ НЕПРЕРЫВНЫМ ЛАЗЕРОМ

В исследовании использовался непрерывный волоконный иттербиевый лазер YLR-2000-MM-WC с длиной волны $\lambda=1,06$ мкм мощностью 2 кВт.

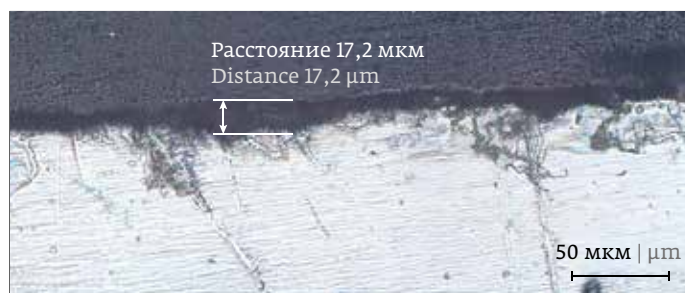


Рис. 2. Поперечный шлиф листа проката толщиной 5 мм, сверху смола, ниже темный слой окалины на поверхности стали

Fig. 2. Transverse section of a mill sheet with a thickness of 5 mm, resin on top, below a dark layer of scale on the steel surface

the optical magnification, and the scanning speed of the laser beam. The overlap coefficient also depends on the speed of linear movement of the scanning figure.

For a circular scanning system, the laser processing area is formed by superimposing rings formed during circular scanning, the center of which shifts

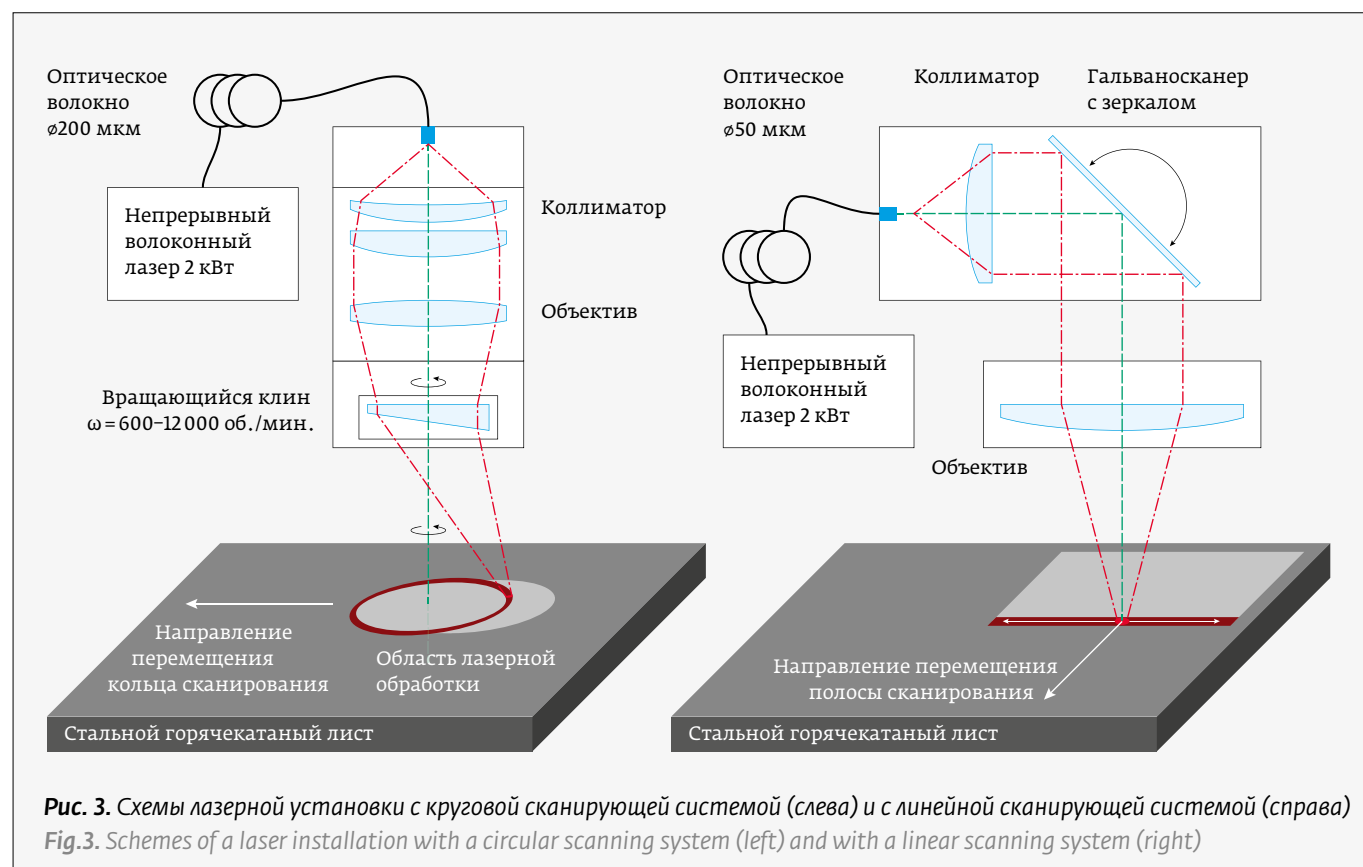


Рис. 3. Схемы лазерной установки с круговой сканирующей системой (слева) и с линейной сканирующей системой (справа)
Fig.3. Schemes of a laser installation with a circular scanning system (left) and with a linear scanning system (right)

Использовались две различные оптические сканирующие системы: круговая и линейная (рис. 3). Получаемые с помощью соответствующих оптических сканирующих систем окружность или линия перемещались прямолинейно для формирования сплошной области обработки. Рассматриваемый способ сканирования поверхности металлов линейно перемещающейся окружностью для выполнения очистки был предложен в патенте [34].

Основными переменными параметрами воздействия являлись плотность мощности, длительность воздействия и коэффициент перекрытия фигур сканирования. Плотность мощности и длительность воздействия зависят от параметров сканирующих систем: диаметра волокна, увеличения оптической системы, скорости сканирования лазерного пучка. Коэффициент перекрытия зависит также от скорости линейного перемещения фигуры сканирования.

Для круговой сканирующей системы область лазерной обработки формируется наложением колец, образованных при круговом сканировании, центр которых смещается при линейном движении сканирующей головки. Образующаяся полоса сканирования состоит из колец, наложенных друг на друга с некоторым перекрытием. Коэффициент перекрытия между соседними кольцами зависит от размера пятна, частоты вращения пятна и линейной скорости перемещения сканирующей головки. При данном способе сканирования коэффициент перекрытия и суммарная доза облучения увеличивается в поперечном направлении, от центра к краю полосы сканирования. Поэтому пороговые удельные энергетические дозы облучения E , необходимые для получения требуемого эффекта воздействия (ниже – дозы облучения), определяются по значениям E и результату обработки в центральной области полосы воздействия. Исследование режимов очистки выполнялось при коэффициенте перекрытия колец по центру полосы сканирования 50%.

Линейная сканирующая система формирует область обработки в виде сплошной зигзагообразной полосы. Коэффициент перекрытия звеньев в центре максимальный и уменьшается в два раза к вершинам звеньев. Пороговые значения дозы облучения E (Дж/см²), необходимой для разрушения и удаления окалины, определялись для центральной области обработки. Исследование режимов очистки выполнялась при коэффициенте перекрытия по центру полосы 50%.

with the linear movement of the scanning head. The resulting scan strip consists of rings superimposed on each other with some overlap. The overlap coefficient between adjacent rings depends on the size of the spot, the speed of rotation of the spot and the linear speed of movement of the scanning head. With this scanning method, the overlap coefficient and the total radiation dose increase in the transverse direction, from the center to the edge of the scanning strip. Therefore, the threshold specific energy doses of radiation E necessary to obtain the desired effect of exposure (below – radiation doses) are determined by the values of E and the result of treatment in the central area of the exposure strip. The study of cleaning modes was performed at a 50% ring overlap coefficient in the center of the scan strip.

The linear scanning system forms the processing area in the form of a continuous zigzag strip. The overlap coefficient of the links in the center is maximum and decreases by half to the tops of the links. The threshold values of the radiation dose E (J/cm²) required for the destruction and removal of scale were determined for the central treatment area. The study of cleaning modes was performed with an overlap coefficient in the center of the strip of 50%.

INVESTIGATION OF THERMOMECHANICAL SCALE DESTRUCTION UNDER THE ACTION OF LASER RADIATION

The following is an assessment the parameters for heating the scale to a depth of 15 microns by radiation from a continuous-wave ytterbium fiber laser. The thickness of the magnetite layer in which laser radiation with a wavelength of 1.06 microns is absorbed is only 230 nm (absorption index $4.4 \cdot 10^4$ cm⁻¹) [35]. The thermal diffusivity of magnetite is $1.8 \cdot 10^{-6}$ m²/s (determined by formula 1). The reflection coefficient of magnetite at a wavelength of 1.06 microns is 0.14 [35].

$$\alpha = \frac{k}{\rho c} = \frac{5,3}{5170 \cdot 586,1} = 1,8 \cdot 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}, \quad (1)$$

where k is thermal conductivity, ρ is density, c is heat capacity, (the values of thermophysical quantities are taken from [36]).

The required heating duration can be estimated as:

$$t = \frac{h^2}{a} = \frac{225 \cdot 10^{-12}}{1,8 \cdot 10^{-6}} = 125 \text{ } \mu\text{s}, \quad (2)$$

where h is the thickness of the scale, a is the thermal diffusivity of the scale.

ИССЛЕДОВАНИЕ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО РАЗРУШЕНИЯ ОКАЛИНЫ ПОД ДЕЙСТВИЕМ ЛАЗЕРНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Выполним оценку параметров для прогрева окалины на глубину 15 мкм излучением непрерывного иттербиевого волоконного лазера. Толщина слоя магнетита, в котором поглощается лазерное излучение с длиной волны 1,06 мкм, составляет всего 230 нм (показатель поглощения $4,4 \cdot 10^4 \text{ см}^{-1}$) [35]. Теплопроводность магнетита составляет $1,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$ (определяется по формуле 1). Коэффициент отражения магнетита на длине волны 1,06 мкм составляет 0,14 [35].

$$\alpha = \frac{k}{\rho c} = \frac{5,3}{5170 \cdot 586,1} = 1,8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}, \quad (1)$$

где k – теплопроводность, ρ – плотность, c – теплоемкость, (значения теплофизических величин взяты из [36]).

Необходимую длительность нагрева можно оценить как:

$$t = \frac{h^2}{a} = \frac{225 \cdot 10^{-12}}{1,8 \cdot 10^{-6}} = 125 \text{ мкс}, \quad (2)$$

где h – толщина окалины, a – теплопроводность окалины.

По формуле (3) оценивается плотность мощности лазерного излучения, при которой в центре пятна температура поверхности окалины достигнет заданной температуры, в данном случае температуры плавления магнетита $T_{\text{пл}} = 1597 \text{ }^\circ\text{C}$ [30]. В приведенной ниже оценке используется формула для импульсного нагревания в течение времени $t = h^2/a$, которое реализуется при сканировании непрерывного пучка со скоростью $V_{\text{ск}}$. При этом принимается приближение равномерного распределения плотности мощности по пятну с характерным размером d , так что: $t = d/V_{\text{ск}}$, откуда можно найти требуемую скорость сканирования [37]. Начальная температура образца принимается равной $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

$$q = \frac{(T_{\text{пл}} - T_{\text{нач}}) k \sqrt{\pi}}{2 \cdot (1 - R) \cdot \sqrt{a t}} = \frac{(1597 - 20) \cdot 5,3 \cdot \sqrt{3,14}}{2 \cdot 0,86 \cdot 15 \cdot 10^{-6}} \approx 57,4 \text{ кВт}/\text{с}^2, \quad (3)$$

где k – теплопроводность магнетита, R – коэффициент отражения магнетита на длине волны 1,06 мкм.

Экспериментально найдены режимы лазерного воздействия, приводящие к разрушению и удалению прокатной окалины в твердом фазовом

According to formula (3), the power density of laser radiation is estimated at which the surface temperature of the scale in the center of the spot reaches a predetermined temperature, in this case the melting point of magnetite $T_{\text{melt}} = 1597 \text{ }^\circ\text{C}$ [30]. The following estimate uses the formula for pulsed heating during time $t = h^2/a$, which is realized when scanning a continuous beam at a velocity of V_{sc} . In this case, an approximation of a uniform distribution of power density over a spot with a characteristic size d is taken, so that: $t = d/V_{\text{sc}}$, from where the required scanning speed can be found [37]. The initial temperature of the sample is assumed to be $20 \text{ }^\circ\text{C}$.

$$q = \frac{(T_{\text{пл}} - T_{\text{нач}}) k \sqrt{\pi}}{2 \cdot (1 - R) \cdot \sqrt{a t}} = \frac{(1597 - 20) \cdot 5,3 \cdot \sqrt{3,14}}{2 \cdot 0,86 \cdot 15 \cdot 10^{-6}} \approx 57,4 \text{ кВт}/\text{с}^2, \quad (3)$$

where k is the thermal conductivity of magnetite, R is the reflection coefficient of magnetite at a wavelength of 1.06 microns.

The modes of laser action leading to the destruction and removal of mill scale in the solid phase state have been experimentally found. The variable parameters of the modes were: power density, duration of exposure and number of impacts.

If the scale removal effect is achieved in the studied mode, then the number of impacts (in practice, the scanning speed) and the specific energy dose E of all impacts (J/cm^2) (threshold energy dose of cleaning) necessary for scale removal were determined for it. The threshold energy density of cleaning is a criterion for the effectiveness of the studied mode. The lower it is, the more energy efficient this mode is and the higher the cleaning performance can be achieved.

The criterion for the destruction and removal of scale was considered to be the destruction and detachment of the upper component. At the same time, the appearance of the surface changed from glossy to matte. Figure 4 shows a micrograph of the sample surface (a), a micro profile of the surface (b) and a micrograph of separated scale particles (c). Laser processing parameters: power density $100 \text{ кВт}/\text{см}^2$, exposure duration $150 \text{ }\mu\text{s}$, total energy dose of treatment $90 \text{ J}/\text{cm}^2$. In this sample, about half of the surface is free of the original scale. Scale removal occurs in the form of fragments whose longitudinal dimensions significantly exceed the transverse one.

Qualitatively, the process of scale removal was described as a result of the following experiment. For a duration of exposure of $150 \text{ }\mu\text{s}$, processing was performed with power densities in the range from

состоянии. Переменными параметрами режимов являлись: плотность мощности, длительность воздействия и число воздействий.

Если в исследуемом режиме достигается эффект удаления окалины, то для него определялось число воздействий (на практике, скорость сканирования) и удельная энергетическая доза E всех воздействий ($\text{Дж}/\text{см}^2$) (пороговая энергетическая доза очистки), необходимые для удаления окалины. Пороговая плотность энергии очистки является критерием эффективности исследуемого режима. Чем она ниже, тем энергоэффективнее данный режим и тем выше может быть достигнута производительность очистки.

Критерием разрушения и удаления окалины считалось разрушение и отслоение верхней составляющей. При этом внешний вид поверхности менялся с глянцевого на матовый. На рис. 4 приведена микрофотография поверхности образца (а), микропрофиль поверхности (б) и микрофотография отделившихся частиц окалины (в). Параметры лазерной обработки: плотность мощности $100 \text{ кВт}/\text{см}^2$, длительность воздействия 150 мкс , суммарная энергетическая доза обработки $90 \text{ Дж}/\text{см}^2$. На данном образце примерно половина поверхности освобождена от исходной окалины.

$35 \text{ to } 350 \text{ кВт}/\text{см}^2$. At a power density of $35 \text{ кВт}/\text{см}^2$ (a single dose of $5.3 \text{ Дж}/\text{см}^2$), no scale removal effect was obtained. At a power density of $350 \text{ кВт}/\text{см}^2$ (a single dose of $52.8 \text{ Дж}/\text{см}^2$), the scale is melted, and the efficiency of thermomechanical destruction decreases. For treatment modes leading to scale removal, the dependence of the threshold energy dose of cleaning on the energy dose of a single exposure was constructed (Fig. 5). The results show that the dose of a single exposure of $13.2 \text{ Дж}/\text{см}^2$ is near the optimal value.

On circular (Fig. 6) and linear (Fig. 7) scanning systems, dependences of the threshold energy dose of cleaning on the duration of exposure for certain levels of power density were obtained. If the required duration of exposure is exceeded at a given power density, scale melts and its removal efficiency decreases. If the duration of exposure is insufficient, the scale may crack, but it is not removed.

It can be seen from the obtained graphs that with an increase in power density, the optimal duration of exposure decreases. The optimal power density levels are in the range of $70\text{--}250 \text{ кВт}/\text{см}^2$, while the duration of exposure must be selected from the range of $280\text{--}80 \text{ мкс}$. At power densities above $300 \text{ кВт}/\text{см}^2$, scale melting is observed; the higher the power

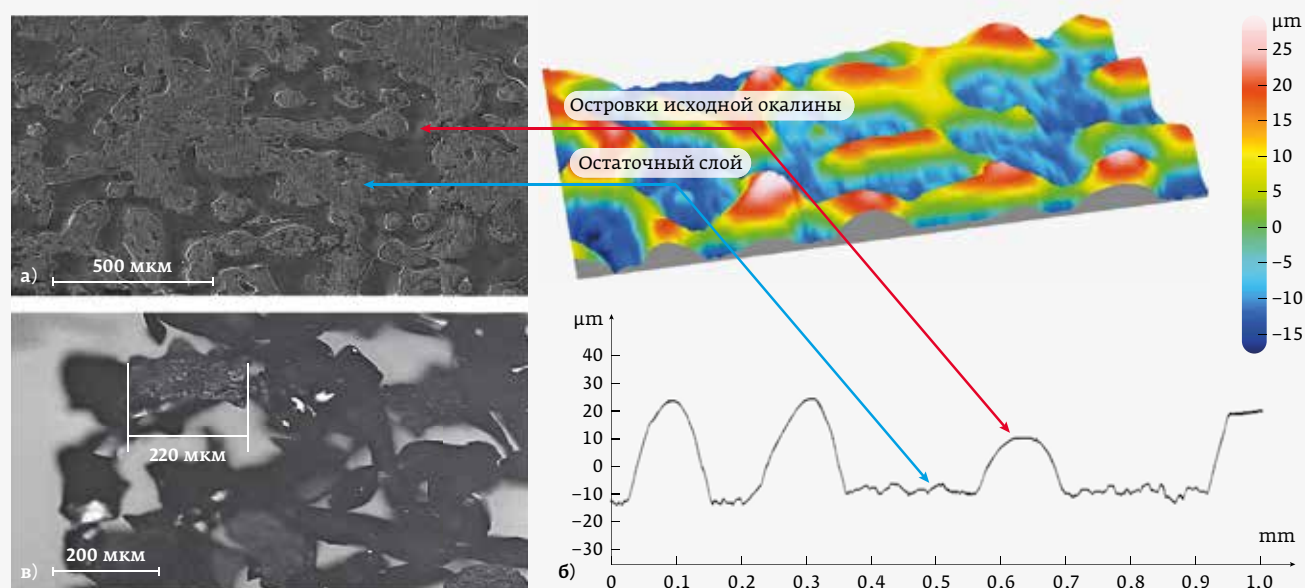


Рис. 4. Результат лазерного воздействия на прокатную окалину: а) поверхность окалины; б) профиль поверхности окалины; в) удалившиеся частицы окалины

Fig. 4. The result of laser exposure to mill scale: а) is the appearance of the scale surface; б) is the profile of the scale surface; в) removed scale particles

Удаление окалины происходит в виде фрагментов продольные размеры которых существенно превышают поперечный.

Качественно процесс удаления окалины был описан в результате проведения следующего эксперимента. Для длительности воздействия 150 мкс выполнялась обработка с плотностями мощности в диапазоне: 35–350 кВт/см². При плотности мощности 35 кВт/см² (доза однократного воздействия 5,3 Дж/см²) не было получено эффекта удаления окалины. При плотности мощности 350 кВт/см² (доза однократного воздействия 52,8 Дж/см²) окалина переплавляется, и эффективность термомеханического разрушения снижается. Для режимов обработки, приводящих к удалению окалины, была построена зависимость пороговой энергетической дозы очистки от энергетической дозы одного воздействия (рис. 5). Полученные результаты показывают, что доза однократного воздействия 13,2 Дж/см² находится вблизи оптимального значения.

На круговой (рис. 6) и линейной (рис. 7) системах сканирования были получены зависимости пороговой энергетической дозы очистки от длительности воздействия для определенных уровней плотности мощности. При превышении необходимой длительности воздействия при данной плотности мощности происходит расплавление окалины, и падает эффективность ее удаления. При

density is, the less effective the thermomechanical destruction is and the greater the heating of the steel surface.

With a duration of exposure of about 100 μ s, the scale is heated to its entire thickness. During cyclic heating and cooling, phase transformations occur in the scale layer and residual tensile stresses are formed. As a result, the scale cracks into individual flakes, which lose their adhesion to the surface during laser treatment and are removed. Scale destruction occurs in the scale layer, and not along the steel-scale boundary, so a thin loosened layer of scale may remain on the surface of the steel. The residual layer can be effectively removed in the evaporative mode by a pulsed nanosecond fiber laser. The energy dose of the final cleaning by pulses with a duration of 200 ns and a pulse energy of 0.5–1 mJ is about 20 J/cm².

CONCLUSION

The paper experimentally demonstrates the possibility of removing mill scale with a thickness of about 15 microns, consisting mainly of magnetite, in a solid phase state due to thermomechanical destruction by radiation from a continuous-wave fiber laser.

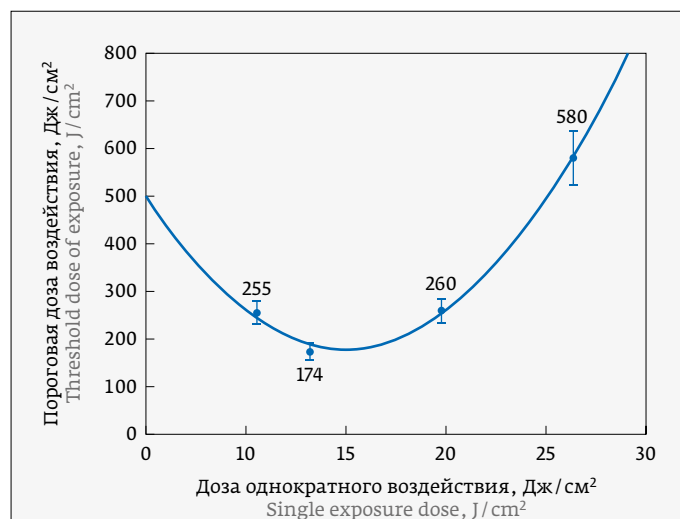


Рис. 5. Зависимость пороговой дозы удаления окалины, от дозы однократного воздействия при длительности воздействия 150 мкс

Fig.5. Dependence of the threshold dose of scale removal on the dose of a single exposure with a duration of exposure of 150 microseconds

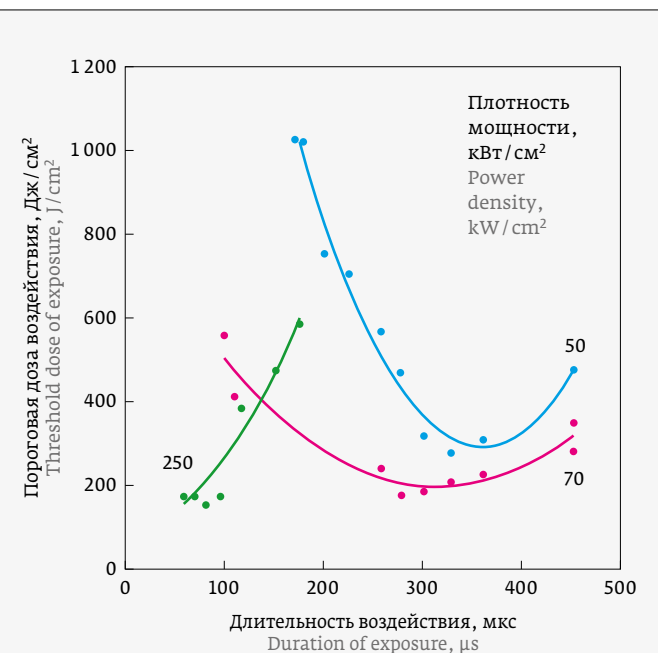


Рис. 6. Зависимость пороговой дозы разрушения окалины от длительности воздействия при заданной плотности мощности, круговая сканирующая система
Fig.6. Dependence of the threshold dose of scale destruction on the duration of exposure at a given power density, circular scanning system

недостаточной длительности воздействия окалина может растрескиваться, но не удаляется.

Из полученных графиков видно, что при увеличении плотности мощности уменьшается оптимальная длительность воздействия. Оптимальные уровни плотности мощности находятся в диапазоне 70–250 кВт/см², при этом длительность воздействия необходимо выбирать из диапазона 280–80 мкс. При плотностях мощности выше 300 кВт/см² наблюдается оплавление окалина: чем выше плотность мощности, тем менее эффективно термомеханическое разрушение и большему нагреву подвергается поверхность стали.

При длительности воздействия около 100 мкс обеспечивается прогрев окалина на всю ее толщину. Во время циклического нагрева и охлаждения в слое окалина происходят фазовые преобразования, и формируются остаточные растягивающие напряжения. В результате окалина растрескивается на отдельные чешуйки, которые в процессе лазерной обработки теряют адгезию с поверхностью и удаляются. Разрушение окалина происходит в слое окалина, а не по границе сталь-окалина, поэтому на поверхности стали может оставаться тонкий разрыхленный слой окалина. Остаточный слой может быть эффективно удален в испарительном режиме импульсным наносекундным волоконным лазером. Энергетическая доза финишной очистки импульсами длительностью 200 нс и энергией в импульсе 0,5–1 мДж составляет около 20 Дж/см².

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В работе экспериментально продемонстрирована возможность удаления прокатной окалина толщиной около 15 мкм, состоящей в основном из магнетита, в твердом фазовом состоянии за счет термомеханического разрушения излучением непрерывного волоконного лазера.

Разрушение окалина при обработке непрерывным лазером при плотностях мощности и длительностях воздействия ниже пороговых, вызывающих испарение, связано с растягивающими

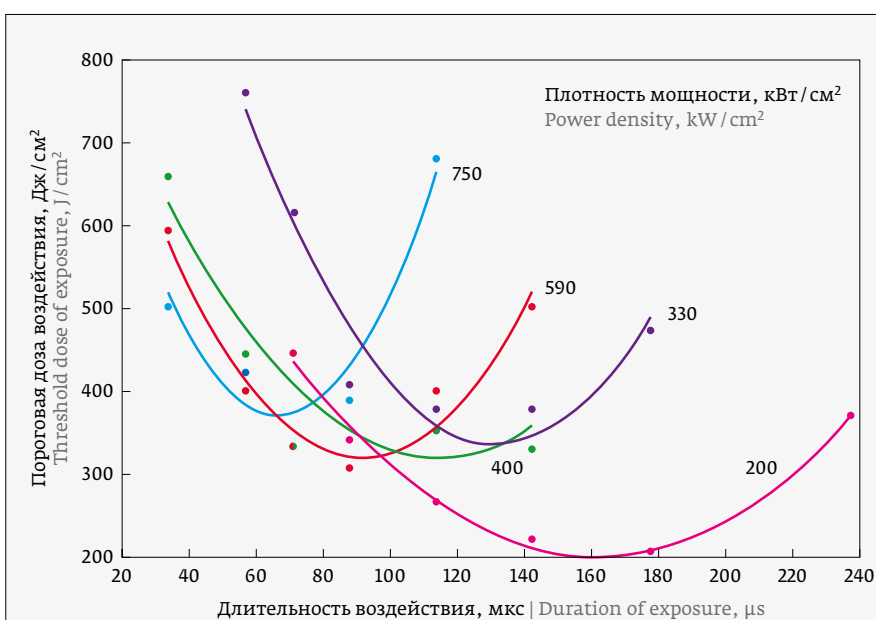


Рис. 7. Зависимость пороговой дозы разрушения окалина от длительности воздействия при заданной плотности мощности, линейная сканирующая система
Fig.7. Dependence of the threshold dose of scale destruction on the duration of exposure at a given power density, linear scanning system

The destruction of scale during continuous laser treatment at power densities and exposure durations below the evaporation thresholds is associated with tensile stresses and thermochemical transformations in the scale structure. The conversion of a mixture of magnetite and metallic iron into wustite reduces the adhesion of the modified scale and probably contributes to the formation of cracks along the scale plane. Intensive cooling of the heated scale after the end of laser exposure leads to the appearance of tensile stresses that form cracks across the scale plane and, with sufficient softening of the scale, lead, as a result, to the detachment of scale particles. A softened loose thin layer of scale remains on the metal surface, which can be easily removed using a laser in evaporative mode.

When examining samples of hot-mill steel, a transition layer was found at the steel-scale boundary, which was formed by the introduction of scale particles into the metal matrix during mill or due to internal oxidation of steel. This layer contains conditions for the occurrence of corrosion processes when interacting with air. In some cases, the removal of the scale layer may not be sufficient to ensure the required level of corrosion resistance of metal surfaces. Therefore, in the future it is necessary to investigate the problem of removing this transition layer.

напряжениями и термохимическими преобразованиями в структуре окалины. Преобразование смеси магнетита и металлического железа в вюстит приводит к снижению адгезии модифицированной окалины и, вероятно, способствует формированию трещин вдоль плоскости окалины. Интенсивное охлаждение нагретой окалины после окончания лазерного воздействия приводит к возникновению растягивающих напряжений, которые формируют трещины поперек плоскости окалины и при достаточном разупрочнении окалины приводят, в итоге, к отслоению частиц окалины. На поверхности металла остается разупрочненный рыхлый тонкий слой окалины, который может быть легко удален с помощью лазера в испарительном режиме.

При исследовании образцов горячекатаной стали на границе сталь – окалина был обнаружен переходный слой, который образовался путем внедрения в металлическую матрицу частиц окалины при прокатке или из-за внутреннего окисления стали. В данном слое заложены условия для протекания коррозионных процессов при взаимодействии его с воздухом. В некоторых случаях удаление слоя окалины может оказаться недостаточным для обеспечения требуемого уровня коррозионной стойкости поверхностей металлоизделий. Поэтому в дальнейшем необходимо исследовать проблему удаления данного переходного слоя.

ЛИТЕРАТУРА

1. Sun, Bin & Cheng, Lei & Du, Chong-Yang & Zhang, Jing-Ke & He, Yong-Quan & Cao, Guang-Ming. Effect of Oxide Scale Microstructure on Atmospheric Corrosion Behavior of Hot Rolled Steel Strip. *Coatings*. 2021; 11: 517. DOI: 10.3390/coatings11050517.
2. Evans Yulik Richardson. Corrosion and oxidation of metals [Text]: (Theory, the basics and their practice. appendix) / Translated from English. Edited by Dr. I. L. Rosenfeld, Doctor of Chemical Sciences. – Moscow: Mashgiz, 1962. 856 p.
3. K. A. Chandler, J. K. Hudson, J. R. Stepners, et al. Corrosion. Guide. Edited by L. L. Schraer, translated by V. S. Sinyavsky – M.: Metallurgy, 1981. 632 p.
4. Evans Yulik Richardson. Corrosion. Passivity and protection of metals [Text] / Translated from English. edited by Prof.-Dr. G. V. Akimov. – Moscow; Leningrad: Metallurgizdat, 1941 (Leningrad). – 888 p.
5. Wang, Xiaochen & Ai, Rui & Yang, Quan & Wang, Shang & Zhang, Yanjie & Meng, Yingying & Ma, Xianghong. Effect of oxide scale structure on shot-blasting of hot-rolled strip steel. *PeerJ Materials Science*. 2. e9. 2020. DOI: 10.7717/peerj-matsci.9.
6. Li X. & Huang T. & Chong A. W. & Zhou, R. & Choo, Y. S. & Hong, M. Laser cleaning of steel structure surface for paint removal and repaint adhesion. *Guangdian Gongcheng. Opto-Electronic Engineering*. 2017; 44: 340–344.
7. Kayahan, Ersin & Candan, Levent & Aras, M. & Gundogdu, Ozcan. Surface Cleaning of Metals Using Low Power Fiber Lasers. *Acta Physica Polonica A*. 2018;134: 371–373.
8. Lu Y., Yang L., Wang Y. Continuous Wave Fiber Laser. *Coatings*. 2019; 9:488.
9. Kravchenko, Ya & Klimentov, Sergey & Derzhavin, S. & Mamonov, D. & Karpov, N. & Mayorov, A. Optimization of laser cleaning conditions using multimode short-pulse radiation. *Optical and Quantum Electronics*. 2020; 52. DOI: 10.1007/s11082-020-02399-1.
10. Sun X., Yu Q., Bai X., Jin G., Cai J., Yuan B. Substrate Cleaning Threshold for Various Coated Al Alloys Using a Continuous-Wave Laser. *Photonics*. 2021;8:395. DOI: 10.3390/photonics8090395.
11. Veiko V. P., Smirnov V. N., Chirkov A. M., Shakhno E. A. *Laser cleaning in mechanical engineering and instrumentation*. – St. Petersburg: ITMO Research Institute, 2013. 103 p.
12. Veiko V., Samohvalov A., Ageev E. Laser cleaning of engraved rolls coupled with spectroscopic control. *Optics and Laser Technologies (JOLT)*. 2013;54:170–175.
13. G. X. Chen, T. J. Kwee, K. P. Tan, Y. S. Choo, M. H. Hong. High-Power Fibre Laser Cleaning for Green Shipbuilding. *Journal of Laser Micro / Nanoengineering*. 2012; 7: 249–253.
14. Deschênes JM., Fraser A. Empirical Study of Laser Cleaning of Rust, Paint, and Mill Scale from Steel Surface. In: Lee J., Wagstaffs., Lambotte G., Allanore A., Tesfaye F. (eds) *Materials Processing Fundamentals 2020. The Minerals, Metals & Materials Series*. Springer, Cham. 2020.
15. Veiko V. P., Shakhno E. A. Physical mechanisms of laser surface cleaning, *Izvestiya RAS, ser. phys.* 2001; 65(4):584–587.
16. Zhuang, Shusen & Kainuma, Shigenobu & Yang, Muye & Haraguchi, Manabu & Asano, Takahiro. Characterizing corrosion properties of carbon steel affected by high-power laser cleaning. *Construction and Building Materials*. 274. 2021. 122085. DOI: 10.1016/j.conbuildmat.2020.122085.
17. Graf, Marcel & Kawalla, R. Scale Behaviour and Deformation Properties of Oxide Scale during Hot Rolling of Steel. *Key Engineering Materials*. 2012;504–506:199–204. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.504-506.199.
18. Ahmadi, D. *Oxide Scales Behaviour During Descaling and Hot Rolling*. The University of Sheffield, England, June 2019, p. ii.
19. Grudev A. P. *Friction and lubricants in metal pressure treatment: Handbook*. – M.: Metallurgy, 1982. 310 p.
20. Chen, Rex & Yuen, W. Oxidation of Low-Carbon, Low-Silicon Mild Steel at 450–900 °C Under Conditions Relevant to Hot-Strip Processing. *Oxidation of Metals*. 2002;57: 53–79. DOI: 10.1023/A:1013390628475.
21. Chen, Rex & Yeun, W. Y. D. Review of the High-Temperature Oxidation of Iron and Carbon Steels in Air or Oxygen. *Oxidation of Metals*. 2003;59:433–468. DOI: 10.1023/A:1023685905159.
22. Yu, Xianglong & Zhao, Jingwei & Wei, Dong & Zhou, Ji. A Review of Microstructure and Microtexture of Tertiary Oxide Scale in a Hot Strip Mill. *Key Engineering Materials*. 2016;716:843–855. DOI: 10.4028/www.scientific.net/KEM.716.843.
23. Choi JW, Choi JW. Convective heat transfer coefficient for high pressure water jet. *ISIJ International*. 2002;42(3): 283–289 DOI: 10.2355/isijinternational.42.283.
24. Teplyakov Yu. N. The decay of wustite, which is part of the scale. *Bulletin of SUSU. Series: Chemistry*. 2009. No.23 (156).
25. Teplyakov Yu. N. Kinetics of phase formation during the decay of wustite // *Bulletin of SUSU. Series: Metallurgy*. 2021;1.
26. Naipinij, Sun & Sukieum, Sasapan & Namprai, Ravinupha & Nilsonthi, Thanasak. Formation of thermal oxide scale and its adhesion to hot-rolled low carbon steels with different final strip thicknesses. *E3S Web of Conferences*. 355. 02008. 2022. DOI: 10.1051/e3sconf/202235502008.
27. CAO, Guang-ming & WU, Teng-zhi & XU, Rong & Zhi-feng, Li & WANG, Fu-xiang & Liu, Zhenyu. Effects of Coiling Temperature and Cooling Condition on Transformation Behavior of Tertiary Oxide Scale. *Journal of Iron and Steel Research, International*. 2015;22:892–896. DOI: 10.1016/S1006-706X(15)30086-8.
28. Shizukawa, Yuta & Hayashi, Shigenari & Yoneda, Suzue & Kondo, Yasumitsu & Tanei, Hiroshi & Ukai, Shigeharu. Mechanism of Magnetite Seam Formation and its Role for FeO Scale Transformation. *Oxidation of Metals*. 2016;86 DOI: 10.1007/s11085-016-9638-8.
29. A.S. 1819908 USSR, MPC C21D 1/82, B21B 45/04. *Method for cleaning rolled metal from scale* / Vakula L. A. – No. 4942792, application 1991.04.23; publ. 1993.06.07. – 5 p.
30. Patent 2280712 C1 Russian Federation, IPC C23F 13/16. *Method for producing cast magnetite* / Khorishko B. A.; patent holder Novomoskovskiy Institute of the D. I. Mendeleev Russian Technical Technical University. – No. 2004138773/02, application 2004.12.30; publ. 2006.07.27, Issue No. 21. – 8 p.
31. Patent 2812150 C1 Russian Federation, IPC B08B 7/00 (2006.01). *Method of laser cleaning of metal surfaces from scale* / Zhurba V. M.; patent holder Limited Liability Company "Scientific and Production Enterprise of Fiber-Optic

- and Laser Equipment" (RU). – No. 2023122472, declared on 08/29/2023; published on 01/23/2024 Byul. No. 3. – 11 p.
32. **Glazunova N. A., Potapenko Yu. A.** The effect of the hydraulic pump installation on the quality of the rolled surface. *Casting and metallurgy*. 2021. № 2
 33. **Temlyantsev N. V.** Development of theory and practice of low-oxidizing and low-carbonizing steel heating technologies. *Bulletin of the Siberian State Industrial University*. 2019; 3 (29): 21–24.
 34. Patent 2619692 Cl Russian Federation, IPC B08B 7/00 (2006.01). *Method of laser purification of metals* / M. V. Volkov; patent holder Limited Liability Company "Scientific and Production Enterprise of Fiber-Optic and Laser Equipment" (RU). – No. 2016120022, announced on 05/24/2016; published on 05/17/2017 Issue No. 14. – 6 p.
 35. *Optical constants of Fe₃O₄ (Iron(II, III) oxide, Magnetite) Quarry 1985*: n, k 0.21–55.6 μm [Electronic resource]. – Access mode: <https://refractiveindex.info/?shelf=main&book=Fe3O4&page=Querry> (date of access: 10/29/2022).
 36. *Physical properties of rocks and minerals (petrophysics)*. Geophysics Reference Book/Edited by N. B. Dortman, – 2nd ed., reprint. and additional – M.: Nedra, 1984–455 p.
 37. **Veiko V. P., Petrov A. A., Samokhvalov A. A.** *Introduction to laser technologies*. – St. Petersburg: ITMO Research Institute, 2018.169 p.

АВТОРЫ

- Журба Данила Владимирович, аспирант, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», Санкт-Петербург; младший научный сотрудник, ООО «Научно-производственное предприятие волоконно-оптического и лазерного оборудования», Санкт-Петербург, Россия.
ORCID: 0009-0001-6814-1737
Вклад автора: планирование и проведение экспериментальных исследований, обзор литературы, анализ и описание результатов, подготовка статьи.
- Журба Владимир Михайлович, генеральный директор, ООО «Научно-производственное предприятие волоконно-оптического и лазерного оборудования», Санкт-Петербург, Россия.
Вклад автора: идея исследования, общее руководство проектом.
- Вейко Вадим Павлович, доктор техн. наук, профессор, главный научный сотрудник, Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет ИТМО», Санкт-Петербург, Россия.
Вклад автора: научное руководство, помощь в представлении результатов, редактирование статьи.

Пуйша Александр Эдуардович, канд. техн. наук, начальник научно-технического отдела, ООО «Научно-производственное предприятие волоконно-оптического и лазерного оборудования», Санкт-Петербург, Россия.
Вклад автора: научная консультация, помощь в редактировании статьи.

ИНФОРМАЦИЯ О КОНФЛИКТЕ ИНТЕРЕСОВ

Авторы заявляют, что реальный или потенциальный конфликт интересов между ними отсутствует.

AUTHORS

- Zhurba Danila Vladimirovich, postgraduate student, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "ITMO National Research University", St. Petersburg; Junior Researcher, LLC "Scientific and Manufacturing Enterprise of Fiber-optic and Laser Equipment", St. Petersburg, Russia.
ORCID: 0009-0001-6814-1737
The author's contribution: planning and conducting experimental studies, literature review, analysis and description of the results, preparation of the article.
- Zhurba Vladimir Mikhailovich, General Director, Scientific and Manufacturing Enterprise of Fiber-Optic and Laser Equipment, St. Petersburg, Russia.
The author's contribution: the idea of the study, the general management of the project.
- Veiko Vadim Pavlovich, Doctor of Technical Sciences, Professor, Chief Researcher, Federal State Autonomous Educational Institution of Higher Education "ITMO National Research University", St. Petersburg, Russia.
The author's contribution: scientific guidance, assistance in presenting the results, editing the article.
- Puisha Alexander Eduardovich, Candidate of Technical Sciences, Head of the Scientific and Technical Department, Scientific and Production Enterprise of Fiber-Optic and Laser Equipment, St. Petersburg, Russia.
The author's contribution: scientific advice, assistance in editing the article.

INFORMATION ABOUT A CONFLICT OF INTEREST

The authors state that there is no real or potential conflict of interest between them.

Новые компоненты для ИК спектроскопии

1000 - 5000 нм

• Светодиоды и фотодиоды



• Многоэлементные светодиодные и фотодиодные сборки (матрицы)



• Сопутствующая электроника

Преимущества

- ✓ низкое энергопотребление;
- ✓ высокое быстродействие;
- ✓ миниатюрные размеры;
- ✓ большой срок службы;
- ✓ отсутствие необходимости частой перекалибровки

Области применения

- газоанализ (детектирование CH₄ и др. углеводородов, CO₂);
- определение содержания воды/ влажности;
- контроль состава материалов/ продуктов на основе анализа ИК спектров поглощения

 Произведено в России



ООО «ЛЕД Микросенсор НТ», 194223, Россия,
г. Санкт-Петербург, ул. Курчатова, д. 10, лит. А
info@lmsnt.ru, info@lmsnt.com; www.lmsnt.ru