



ЛАЗЕРНЫЕ ТЕХНОЛОГИИ В МАШИНОСТРОЕНИИ

В. Бирюков, к.т.н.,
ФГБУ Институт машиноведения
им. А.А. Благонравова РАН,
laser-52@yandex.ru

Лазерные технологии уже давно перешагнули стены лабораторий и вышли на промышленные просторы. Обработка металлов мощными лазерами превратилась в стандартный процесс. И теперь обработка материалов менее мощным лазерным пучком тоже превращается в стандартные технологии. Но есть ниши, где эффекты взаимодействия лазерного излучения с веществом пока находятся на стадии исследований. И хотя существует множество лазерных технологий, авторы статьи остановили свое внимание на тех из них, в которых отечественные разработчики достигли определенных успехов.

Самые востребованные промышленностью лазерные методы обработки материалов – это резка, сварка и маркировка. При сварке сталей, которые могут выйти на структуру мартенсита, лучше использовать гибридную технологию сварки. Методы гибридной сварки обеспечивают большие времена термических циклов, по производительности опережают электродуговую сварку и удовлетворяют требованиям поточного производства. В основном их применяют в автомобилестроении. Лазерная сварка наиболее подходит аустенитным сталям. Использование сканирующих устройств, обеспечивающих колебание лазерного пучка, позволяет сваривать детали даже при больших зазорах, при неточной подгонке стыка.

Обработка металла излучением мощных CO₂- или волоконных лазеров – наиболее емкая часть современного рынка лазерной обработки материалов, она формирует примерно 70% всего объема продаж лазеров. Лазерные системы для резки листового металла в прошлом году обеспечили 5 млрд. продаж. Среди мощных источников излучения на долю лазерных систем с волоконными лазерами приходится 20%, но доминирующую роль по-прежнему играют

LASER SYSTEMS AND TECHNOLOGIES IN ENGINEERING INDUSTRY

V. Biryukov, Candidate of Engineering,
A.A. Blagonravov Institute of Engineering Science of
the Russian Academy of Sciences, Federal State Budget
Institution, laser-52@yandex.ru

Laser technologies have overstepped the walls of laboratories and gone out to the industrial space long ago. Metal treatment with the high-power lasers has turned into the standard process. And now the treatment of materials with the less powerful laser beam also turns into the standard technologies. But there are niches where the effects of interaction of the laser radiation with substance are still at the research stage. And though there are many laser technologies, authors decided to consider those technologies in which the developers from our country achieved certain success.

Treatment of metal with the radiation of the high-power CO₂- or fiber lasers is the most capacious part of the modern market of materials laser treatment; it forms approximately 70% of the total volume of lasers sale. Laser systems for the sheet metal cutting gave 5 billion of sales last year. Among high-power radiation sources 20% falls to the share of laser systems with fiber lasers but still gas lasers play the dominating role [1]. However, it is getting rather crowded at the domestic market of manufacturers of the laser equipment for the engineering industry. Parameters of the laser facilities of various manufacturers are comparable to each other so the competition takes place in the area of after-sales service and velocity of the spare parts delivery. Let us consider the innovations of the domestic laser technological facilities [2, 3].

National Institute of Aviation Technologies (NIAT) OJSC and Rukhservomotor LLC (Minsk) produce the laser technological equipment for the dimensional treatment of components from the plane sheet billets, laser facilities for the flat work nesting of metallic and non-metallic components. The fiber lasers of the IRE-Polyus Scientific and Technical Association (STA) LLC with the capacity of 2-4 kW and linear motors are used in the models КЛП-2D manufactured by the NIAT OJSC and LaserCUT-3015-3 manufactured by the Rukhservomotor LLC. No-load speed of these systems is 100 m/min and 180 m/min upon the repositioning



газовые лазеры [1]. Однако на отечественном рынке производителей лазерного оборудования для машиностроения становится тесновато. Параметры лазерных комплексов различных производителей сопоставимы друг с другом, соревнование идет в области сервисного обслуживания и скорости поставки запасных частей. Рассмотрим новинки отечественных лазерных технологических комплексов [2,3].

ОАО НИАТ и ООО "Рухсервомотор" (Минск) выпускают лазерное технологического оборудования для размерной обработки деталей из плоских листовых заготовок, лазерные комплексы для раскроя плоских деталей из металлических и неметаллических материалов. В моделях КЛР-2D производства ОАО НИАТ и LaserCUT-3015-3 производства ООО "Рухсервомотор" используются волоконные лазеры ООО НТО "ИРЭ-Полюс" мощностью 2-4 кВт и линейные двигатели. Скорость холостого хода этих систем составляет соответственно 100 и 180 м/мин при погрешности повторного позиционирования 0,05 и 0,01 мм. Оборудование предназначено для раскроя углеродистых сталей толщиной до 25 мм, коррозионно-стойких - до 10 мм, алюминия - до 8 мм, латуни - до 5 мм. Кроме того, на КЛР-2D отработана технология резки органопластиков - до 8 мм; стеклопластиков - до 6 мм; углепластиков - до 4 мм.

Для размерной обработки деталей сложной пространственной конфигурации из полимерных композиционных материалов в ОАО НИАТ разработан лазерный технологический комплекс (модель ЛТК-3D). Он имеет наибольшие прямолинейные перемещения, максимальные координаты перемещения, измеренные в миллиметрах: траверсы (координата X - 5000 мм), каретки (координата Y - 2500 мм), ползуна (координата Z - 800 мм). Максимальные скорости прямолинейных перемещений, измеренные в единицах "метр в минуту", по координатам X, Y - 100 м/мин, по координате Z - 30 м/мин; максимальные скорости угловых перемещений по координатам A, C - 120 град/с. Комплекс оснащен волоконным лазером мощностью 3 кВт. Точность воспроизведения контура - 0,05 мм. Комплекс предназначен для лазерной резки деталей различного класса, в том числе ресурсных деталей для авиационной и космической промышленности, деталей из полимерных композиционных материалов (ПКМ) (углепластика, органопластика), а также из других материалов (углеродистых, нержавеющих и высокопрочных сталей, титановых

error of 0.05 mm and 0.01 mm respectively. Equipment is intended for the cutting of carbon steel up to 25 mm in thickness, corrosion-resistant steel - up to 10 mm in thickness, aluminum - up to 8 mm in thickness, brass - up to 5 mm in thickness. Besides, the technology of cutting of the organoplastics up to 8 mm, glass fiber reinforced plastics up to 6 mm, carbon fiber reinforced plastics up to 4 mm was well-tested on the КЛР-2D.

The laser technological facility (model ЛТК-3D) was developed in the NIAT OJSC for the dimensional treatment of the components of complicated spatial configuration from the polymer composite materials. It has the largest rectilinear motions, maximum motion data measured in millimeters: of traverse (X coordinate - 5000 mm), of carriage (Y coordinate - 2500 mm), of slider (Z coordinate - 800 mm). Maximum speed of the rectilinear motions measured in meters per minute on X and Y coordinates is 100 m/min, on Z coordinate is 30 m/min; maximum speed of angular motions (deg/s) on A and C coordinates is 120 deg/s. Facility is equipped with the fiber laser with the capacity of 3 kW. Accuracy of the outline reproduction is 0.05 mm. Facility is intended for the laser cutting of the components of various categories including the resource details for the aviation and space industry, details of polymer composite materials (PCM) (carbon fiber reinforced plastics, organoplastics), and other materials (carbon, stainless and high-strength steel, titanium and aluminum alloys). It is possible to perform the external outline cutting and holes cutting. Maximum thickness of the treated components of carbon fiber reinforced plastics is 4 mm, of organoplastics is 8 mm. Overall dimensions of the facility are 8000×5000×2500 mm (Fig. 1).

Comparison of the facility parameters with the foreign facilities SG-510MK, Mazak, Japan, Domino 1325, Prima Industrie, Italy, L-3D, Trumpf, Germany confirms its competitive ability at the domestic and foreign markets. From the variety of the foreign laser facilities used at the enterprises the ЛТК-3D equipment is distinguished by its broad capabilities. Firstly, these facilities do not make it possible to cut the carbon fiber reinforced plastics with the required quality and their volume is almost 70% of the total volume of PCM used in the engineering industry. Secondly, the ЛТК-3D is made for the treatment of organoplastics and glass fiber reinforced plastics by 1.5-2 times thicker than materials treated with the comparable laser facilities. Third advantage consists in the ability of treatment of the larger components with high speeds on the developed equipment; fourth advantage consists in the considerable reduction of operating costs at the expense



и алюминиевых сплавов). На нем можно производить обрезку по внешнему контуру и вырезку отверстий. Максимальная толщина обрабатываемых деталей из углепластика – 4 мм, из органо-пластика – 8 мм. Габаритные размеры комплекса 8000×5000×2500 мм (рис. 1) [2, 3].

Сравнение параметров комплекса с зарубежными комплексами SG-510МК, Mazak, Япония, Domino 1325, Prima Industrie, Италия, L-3D, Trumpf, Германия, подтверждает его конкурентоспособность на внутреннем и внешнем рынках. Из многообразия используемых на предприятиях зарубежных лазерных комплексов оборудование ЛТК-3D выделяется своими широкими возможностями. Во-первых, эти комплексы не позволяют резать углепластики с необходимым качеством, а ведь их объем составляет почти 70% от общего объема ПКМ, используемых в машиностроении. Во-вторых, ЛТК-3D создан под обработку органо- и стеклопластиков, в 1,5-2 раза большей толщины, чем обрабатываемые на сравниваемых лазерных комплексах. Третье преимущество – на создаваемом оборудовании возможна обработка более крупных деталей с большими скоростями, четвертое – существенно снижаются эксплуатационные расходы за счет высокого КПД лазера и длительного срока службы его компонентов до – 50 000 часов.

Пример использования пятикоординатного лазерного станка для финишной доводки керамических стержней – известная продукция ФГУП "САЛЮТ": рабочие лопатки авиационного двигателя, которые относятся к особо ответственным элементам конструкции. При изготовлении керамических стержней для отливки лопаток на отдельных элементах (по линии разреза пресс-формы) остается облой, который необходимо удалить. Пятикоординатный лазерный станок для финишной доводки керамических стержней обеспечивает не только обработку стержней, но и позволяет бесконтактным образом контролировать геометрию и размер элементов стержней, что важно для надежной эксплуатации охлаждаемых рабочих лопаток. Использование вентиляционных двигателей, цифровых приводов и высокоточной механики позволило добиться точности позиционирования 1 мкм при максимальной скорости перемещения до 50 мм/с. Лазерный станок оснащен современным лазером с выходной мощностью до 150 Вт и изменяемой формой выходного импульса (рис. 2).

ООО "Лазерный Центр", Санкт-Петербург, разработало и запустило в серийное производство



Рис.1. Пятикоординатный лазерный станок ЛТК-3D
Fig. 1. ЛТК-3D Five-Axis Laser Technological Facility

of high coefficient of laser efficiency and long period of service of its components up to 50000 hours.

Example of application of the five-axis laser machining system for the finishing development of ceramic bars is well-known product of SALYUT Federal State Unitary Enterprise (FSUE) – operating blades of aviation engine which refer to especially critical components of structure. When producing the ceramic bars for the casting of blades on the separate elements (along the moulding split line) the flash is left over and it must be removed. Five-axis laser machining system for the finishing development of ceramic bars not only treats the bars but also controls geometry and size of the bar elements non-contacting for the enhancement of quality and operation reliability of the cooled operating blades for the various products. Application of the ac electronic motors, digital actuators and high-precision mechanic parts made it possible to achieve the positioning accuracy of 1 μm upon the maximum speed of motion up to 50 mm/s. Laser machining system is equipped with the modern laser with output power up to 150 W and changeable form of the output pulse (Fig. 2).

Lazerniy Tsentr LLC, Saint Petersburg developed and commercialized the model ЛТУ RX-20 intended for the cutting of thin gage materials (up to 0.5 mm in thickness) and deep chasing [4]. Facility is created on the basis of 20 W ИЛМИ-0.5-20 fiber laser manufactured by the IRE-Polyus STA, LLC. Laser functions in the pulse mode with the pulse repetition frequency $f=20-100$ kHz, pulse duration $\tau=120$ ns. Pulse energy is up to 1 mJ. Warranted operating time of laser is not less than 30000 hours, the air cooling is used, power consumption is ~300 W, warm-up period does not surpass 3 minutes. Laser does not require the special maintenance and additional system of cooling. X-Y two-axis table is used with the stepping motors, treatment field dimensions are 250×250 mm, positioning accuracy is 2.5 μm . Possibility of the rotator installation for the cutting of ware with the

модель ЛТУ RX-20, предназначенную для резки тонколистовых материалов (толщиной до 0,5 мм) и глубокой гравировки [4]. Комплекс создан на базе 20-Вт волоконного лазера ИЛМИ-0.5-20 производства ООО НТО "ИРЭ-Полюс". Лазер работает в импульсном режиме с частотой следования импульсов $f=20-100$ кГц, длительность импульса $\tau \sim 120$ нс. Энергия в импульсе до 1 мДж. Время гарантированной наработки лазера составляет не менее 30 000 часов, охлаждение воздушное, потребляемая мощность ~ 300 Вт, время выхода на рабочий режим не превышает 3 мин. Лазер не требует специального обслуживания и дополнительной системы охлаждения. Использовался двухкоординатный стол X-Y с шаговыми двигателями, размер поля обработки 250×250 мм, точность позиционирования 2,5 мкм. Для расширения технологических возможностей в RX-20 предусмотрена возможность установки вращателя для резки изделий с цилиндрической поверхностью. Программирование осуществляется в форматах AutoCAD и CorelDRAW, возможно также программирование в ручном режиме. Перечень областей, в которых возможно использование RX-20, очень велик: изготовление масок для нанесения паяльной пасты на печатные платы, направляющие для принтеров с игольчатой печатью, прижимы полупроводниковых лазеров, резка медицинских стентов из тонкостенных трубок нержавеющей стали. Еще одним важным направлением может стать применение RX-20 для глубокой маркировки - гравировки. Дело в том, что в настоящее время для маркировки используют сканаторные системы, это "МиниМаркер 2", в обычном исполнении или, с учетом всех требований Европейской безопасности, новое семейство скоростных маркеров "TurboMarker". Они обеспечивают скорость маркировки до нескольких метров в секунду. Однако при этом глубина маркировки



Рис.2. Пятикоординатный лазерный станок для финишной доводки керамических стержней

Fig. 2. Five-Axis Laser Machining System for the Finishing Development of Ceramic Bars

cylindrical surface is provided for the expanding of manufacturing capabilities in RX-20. Programming is implemented in the formats of AutoCAD and CorelDRAW, also the programming in manual mode is possible. The list of fields where the RX-20 can be applied is very big: manufacturing of masks for the deposition of soldering paste on the printed circuit boards, staves for the dot-matrix printers, pressings of semiconductor lasers, cutting of the medical stents from the stainless steel thin-walled tubes. Another important area can be the application of RX-20 for the deep marking - chasing. The fact is that at the moment the MiniMarker 2 scanatory systems are used for the marking in regular version or the TurboMarker population of velocity markers with regard to the requirements of European safety. They provide the marking speed up to several meters per second. However, the marking depth is relatively not high and mainly is not more than 50-100 μ m. At the same time quite a number of tasks exists where the marking depth is required to be much higher - up to 0.5 mm. Simple increase of laser capacity does not give wanted effect for a variety of reasons. In this case particularly the RX-20 can be used. Upon that the marking speed decreases because the marking is accomplished at the expense of relatively slow motion

относительно невелика и в основном не превышает 50–100 мкм. В то же время существует целый ряд задач, где глубина маркировки требуется существенно выше – до 0,5 мм. Простое увеличение мощности лазера не дает нужного эффекта в силу ряда причин. Вот как раз в этом случае можно использовать RX-20. Скорость маркировки при этом снижается, поскольку маркировка осуществляется за счет относительно медленного перемещения детали с помощью координатного стола, однако глубина маркировки существенно возрастает.

Другое крупное технологическое применение лазерных комплексов – это выращивание монокристаллических волокон (МКВ). Дело в том, что применение композиционных материалов в двигателях, энергетических и транспортных установках обеспечивает им скачок в увеличении производимой мощности, уменьшают массогабаритные характеристики машин и приборов. Монокристаллические волокна применяют при изготовлении композиционных материалов. Известно, что прочность композиционных материалов определяется свойствами армирующих волокон, а матрица в основном должна перераспределять напряжения между армирующими элементами. Поэтому прочность и модуль упругости волокон должны быть значительно больше, чем прочность и модуль упругости матрицы. Жесткие армирующие волокна воспринимают напряжения, возникающие в композиции при высоких нагрузках, придают ей прочность и жесткость в направлении ориентации волокон. Применение волокон оксидов алюминия позволит выйти на новый уровень физико-механических свойств композиционных материалов. Предел прочности МКВ оксида алюминия не изменяется до температуры 1600 °С. Сапфировое кристаллическое волокно (Al_2O_3) весьма полезно благодаря однородности своих физических свойств. Особую ценность волокна представляют его высокая температура плавления и практически нерастворимость в воде. Применение МКВ в широком круге оптических приборов обеспечивается его физическими свойствами и волнопроводящей способностью. Волокно способно передавать электромагнитное излучение широкого диапазона длин волн (300–4000 нм) и обладает высоким сопротивлением к любым химическим воздействиям. Поэтому такие волокна могут быть использованы в лазерах или в качестве датчиков в оборудовании, работающем при высоких температурах



Рис.3. Процесс роста монокристаллического волокна оксида алюминия

Fig. 3. Process of Growing of the Oxide Aluminum Monocrystalline Fiber

of the component with the help of coordinate table, however, the marking depth considerably grows.

Another broad technological application of the laser facilities consists in the growing of monocrystalline fibers (MCF). The fact is that the application of composite materials in engines, power installations and transport plants provides the sharp increase of power output, reduction of machines and devices mass. Monocrystalline fibers are applied upon the manufacturing of the composite materials. It is known that the strength of composite materials is determined by the properties of fibers and the matrix mainly has to redistribute the stresses between the reinforcing elements. That is why the strength and elasticity modulus of fibers must be considerably larger than the strength and elasticity modulus of matrix. Hard reinforcing fibers sense the stresses which occur in composition under high loading, strengthen it and make it harder toward the orientation of fibers. Application of fibers of the aluminum oxides will make it possible to get to a new level of the physical-mechanical properties of the composite materials. Ultimate strength of the aluminum oxide MCF does not change up to the temperature of 1600 °C. Sapphire crystalline fiber (Al_2O_3) is very useful due to the homogeneity of its physical properties. Exceptional value of fiber is represented by high temperature of its melting and practical insolubility in water. Application of MCF in the wide range of optical devices is provided by its physical properties and wave-conductive ability. Fiber is capable of transferring the electromagnetic radiation of wide range of the wave length (300-4000 nm) and has high resistance to any chemical actions. Therefore, such fibers can be used in lasers or as sensors in equipment which operates under high temperatures or in corrosion environment where the traditional sensor fibers do not work. They can be applied in the medicine as conductors for the transferring radiation to the micro-zones. In other words, it is forecasted that

или в коррозионной среде, где традиционные сенсорные волокна не работают. В медицинской области они могут быть использованы в качестве проводников для передачи излучения к микроразонам. Специалисты прогнозируют в будущем высокую потребность промышленности в таких материалах.

Учитывая стратегическую важность технологии выращивания МКВ, создание лазерных комплексов для их производства на сегодняшний день является актуальной задачей. Однако пока идут только поиски оптимальных параметров этих процессов. Известна лазерная установка для выращивания сапфировых волокон в Стенфордском Университете [5,6]. В ней первичный генерированный лазерный луч, имеющий обычный гауссовский профиль распределения интенсивности излучения по поперечному сечению, трансформируется в лазерный луч с кольцевым профилем распределения интенсивности. Этот лазерный луч фокусируют на кончике твердого питающего материала, получая расплавленный питающий материал. Затравка подается в этот расплавленный питающий материал и вступает с ним в контакт. Когда затравка соединится с расплавленным питающим материалом, ее удаляют из расплава так, что расплавленный материал вытягивается в виде кристаллического волокна. Производство кристаллических волокон на этой установке осуществляется на воздухе при обычном атмосферном давлении. Для повышения качества сапфировых волокон в США и в разработанном нами оборудовании выращивание МКВ производится в вакуумной камере в среде

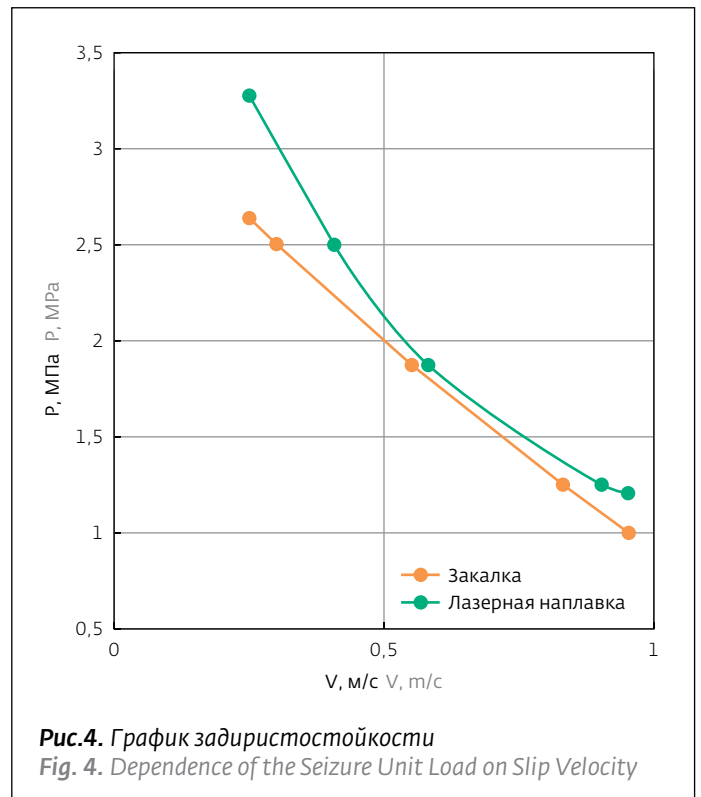


Рис. 4. График задиристостойкости
Fig. 4. Dependence of the Seizure Unit Load on Slip Velocity

there will be a high demand of the industry for such materials.

Taking into account the strategic significance of the technology of MCF growing the construction of laser facilities for their manufacturing is urgent task at the moment. However, the optimal parameters of these processes are still being searched. As is known, there is laser facility for the sapphire fibers growing at the Stanford University [5, 6]. The initial generated laser beam which has the regular Gaussian profile of the



инертного газа - гелия. В ИМАШ РАН разработан и изготовлен опытный образец оборудования для выращивания монокристаллических волокон (МКВ) оксида алюминия с использованием лазерного нагрева питателя и контроля процесса выращивания. Диаметр питателя отечественной установки может составлять 500-700 мкм, а получаемое сапфировое волокно 100-200 мкм [7]. На рис. 3. представлен процесс получения МКВ оксида алюминия.

Менее распространены лазерные методы наплавки, термоупрочнения и легирования. Однако эти технологии обещают в скором времени бурный рост, веерообразно распространяясь в широком круге промышленных производств. Еще одна перспективная лазерная технология, обещающая стать массовой производственной технологией, - это лазерная наплавка порошковых материалов. Технологию лазерной обработки используют для придания новым деталям фрикционных и защитных свойств и для восстановления изношенных деталей. В наших экспериментах мы наносили на поверхность образцов стали 20Х обмазку на водной основе (в ней смешаны оксиэтилцеллюлозы и порошок ФБХ6-2 с добавлением ультрадисперсного порошка алюминия). Затем оплавливали покрытие с помощью излучения CO₂-лазера на установке "Комета-М" (мощность луча 1400 Вт, частота сканирования 225 Гц [8]). Результаты металлографического анализа показали, что ширина наплавленного слоя составила 0,9-1,1 мм. Исследование поверхностной твердости обнаружило, что твердость наплавленного слоя составляет 56-59 HRC, тогда как твердость цементованного слоя до обработки составляла 55 HRC. В ИМАШ РАН разработана специализированная оснастка для машины трения МТУ-01 и проведены ее испытания на задиростойкость. Обнаружено, что слой, наплавленный лазером, обладает большей задиростойкостью в сравнении с объемно закаленным образцом (рис.4). Эта технология была разработана для восстановления осей подвески редуктора вагона метрополитена, но она может быть применена не только к телам вращения, но и к плоским поверхностям и деталям сложной пространственной формы.

И хотя существует множество лазерных технологий, мы рассмотрели лишь те из них, в которых достигнуты заметные успехи, повышающие конкурентоспособность выпускаемой продукции.

radiation intensity distribution on the cross-section is transformed into the laser beam with the annulus profile of the intensity distribution. This laser beam is focused on the edge of hard feeding material and the melted feeding material is obtained. The seeding agent is fed into this melted feeding material and comes into contact with it. When the seeding agent joins the melted feeding material it shall be removed from the melt in such a way that the melted material is stretched in the form of crystalline fiber. Manufacturing of the crystalline fibers on this facility is accomplished in the air under ordinary atmospheric pressure. For the quality enhancement of the sapphire fibers in the USA and at the equipment developed by us the MCF growing is accomplished in the vacuum chamber in the helium inert gas environment. At the Institute of Engineering Science of the Russian Academy of Sciences the prototype of equipment for the growing of monocrystalline fibers (MCF) of the aluminum oxide was developed and made with the usage of the laser heating of feeder and control of the growing process. Diameter of feeder of the facility of our country can be 500-700 μm and obtained sapphire fiber can be 100-200 μm [7]. The process of obtaining of the aluminum oxide MCF is given in Fig. 3.

One more prospective laser technology which promises to become mass manufacturing technology is the laser surface coating of the powder materials. Technology of the laser treatment is used for the obtaining of the frictional and protective properties by the new components and for the restoration of worn-out parts. In our experiments we put the water-base coating (the oxyethyl celluloses and ФБХ6-2 powder are mixed with adding the aluminum super-dispersed powder) on the 20X steel samples surface. Then we melted the coating with the help of CO₂ laser radiation on the Kometa-M facility (laser beam power - 1400 W, scanning frequency - 225 Hz [8]). With the help of metallographic analysis it was determined that the width of built-up layer was 0.9-1.1 mm. Research of the surface hardness showed that the hardness of built-up layer was 56-59 HRC, whereas the hardness of carburized layer before the treatment was 55 HRC. The specialized accessories for the МТУ-01 friction test machine were developed and the tests on scoring resistance were accomplished. Tests showed that the built-up layer has higher scoring resistance in comparison with the volumetric hardened sample. The curves of scoring resistance are shown in Fig. 4. This technology was developed for the restoration of axes of the reduction gear suspension of the transit vehicle but it can be applied not only for the solids of revolution but also for the flat surfaces and parts of the complicated space form.

**ЛИТЕРАТУРА**

1. **Овертон Г., Ноджи А., Бельфорте, Д.А., Холтон К.** Лазерные рынки развиваются несмотря на "встречные ветры" в глобальной экономике. – Лазер-Информ. – М.: ЛАС.- 2013, №3, с.1-8.
2. **Блинков В.В., Вайнштейн И.В., Малахов Б.Н., Кондратюк Д.И.** Лазерный технологический комплекс для размерной обработки деталей сложной пространственной конфигурации из полимерных композиционных материалов. – В кн.: Ориентированные фундаментальные исследования – новые модели сотрудничества в инновационных процессах. Сборник научных трудов и инженерных разработок / Под. ред. Б.В. Гусева. – М.: Эксподизайн-холдинг, 2008, с.226–231.
3. **Щербаков С.И.** Пятикоординатный лазерный станок для финишной доводки керамических стержней. – В кн.: Ориентированные фундаментальные исследования – федеральные целевые программы, наукоемкое производство. Сборник научных трудов и инженерных разработок / Под ред. К.В. Фролова. – М.: Эксподизайн, 2007, с. 85–87.
4. **Горный С.Г., Поляков И.В., Кузьмичев Д.В., Попков С.Е.** Лазерная технологическая установка (ЛТУ) RX-20 для обработки материалов на базе волоконного лазера. – В кн.: Ориентированные фундаментальные исследования – новые модели сотрудничества в инновационных процессах. Сборник научных трудов и инженерных разработок / Под. ред. Б.В. Гусева. – М.: Эксподизайн-холдинг, 2008, с.252–257.
5. **Jundt D.N., Fejer M.M., Byer R.L.** Characterization of Crystal fibers for Optical Power Delivery Systems. – Applied Physics Department, University, Stanford, California 94305 (Received 11 Aug. 1989; accepted for publication 18 Sep. 1989).
6. **Jundt D.N. et al.** Characterization of single-crystal sapphire fibers for optical power delivery systems. – Appl. Phys. Lett., 1989, 55(21) 20 Nov.
7. **Бирюков В.П.** Лазерные системы и технологии в машиностроении. – В кн.: Современная техника и технологии. Лекции Всероссийской молодежной научной школы. – М.: ИМАШ РАН, 2012, с.3–17.
8. **Бирюков В.П., Фишков А.А.** Анализ отказов деталей вагонов метрополитена и восстановление их методом лазерной наплавки. – Тяжелое машиностроение, 2012, №10, с.14–17.