

ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЕ ОБЕСПЕЧЕНИЕ КАЧЕСТВА ДЕТАЛЕЙ ПОВЕРХНОСТНЫМ ПЛАСТИЧЕСКИМ ДЕФОРМИРОВАНИЕМ

В.З. Зверовщиков, С.А. Нестеров, Р.А. Агальцов
Пензенский государственный университет
г. Пенза, Россия

Рассмотрены способы упрочнения поверхностей деталей пластическим деформированием. Показана эффективность динамического воздействия рабочих тел на качество поверхностей деталей. Разработан новый способ центробежного динамического упрочнения деталей. Установлена аналитическая зависимость влияния технологических факторов и конструктивных параметров на осевое смещение загрузки в центробежном цилиндрическом барабане при угловых осцилляциях.

Ключевые слова: динамическое упрочнение, планетарное вращение, угловые осцилляции, качество поверхности, центробежные силы.

The methods of hardening the surfaces of parts by plastic deformation are considered. The effectiveness of the dynamic effect of working bodies on the surface quality of parts is shown. A new method of centrifugal dynamic hardening of parts has been developed. The analytical dependence of technological factors and design parameters on the axial displacement of the load in a centrifugal cylindrical drum with angular oscillations is established.

Key words: dynamic hardening, planetary rotation, angular oscillations, surface quality, centrifugal forces.

В качестве наиболее перспективного направления повышения работоспособности деталей машин следует рассматривать технологическое, которое позволяет обеспечивать требуемую точность формы и размеров и достигать заданных показателей качества поверхностного слоя.

В зависимости от условий эксплуатации в машиностроении применяют различные способы поверхностного пластического деформирования (ППД), основанные на статическом или динамическом воздействии упрочняющих рабочих тел на поверхностные слои металла для их

пластической деформации. Многообразие способов ППД делает технологию упрочнения универсальной и позволяет использовать ее для деталей практически любых размеров и конфигурации с любой поверхностной твердостью. Поэтому упрочнение стальных деталей ППД получило широкое распространение в машиностроении. При этом важно учитывать, что влияние отделочно-упрочняющих операций на эксплуатационные характеристики деталей зависит от физико-механических свойств материала, из которого они изготовлены.

Однако рекомендации по эффективности упрочнения пластическим деформированием конструкционных сталей нередко являются противоречивыми. Длительное время существовало мнение, что упрочнение можно использовать лишь для сталей с невысокой твердостью, которые обладают значительными пластическими свойствами, а для термически обработанных сталей с твердостью более 35–40 HRC применение ППД для повышения эксплуатационных свойств не рассматривалось. Также считалось невозможным производить упрочнение пластическим деформированием поверхностей деталей после цементации или азотирования, что мотивировалось высокой твердостью и хрупкостью поверхностных слоев.

Исследования отечественных ученых, в частности профессоров И.В. Кудрявцева и Д.Д. Папшева [1, 2], показали, что режимы упрочнения зависят от физико-механических свойств материала деталей и при ППД эффективное упрочнение может быть достигнуто регулированием давления деформирующего элемента, величина которого неодинакова для различных материалов. Мягкие и пластичные материалы упрочняются при меньшем, а твердые при большем давлении. Так, в стали 45 прирост твердости прекращается при контактном давлении 2100 МПа, а в стали У8 – при давлении 2200 МПа. Таким образом, степень упрочнения стали с феррито-перлитной структурой составила 1,6 раза, а стали У8 с перлитной структурой – 1,55 раза, т.е. с увеличением в структуре металла перлита степень поверхностного упрочнения снижается.

Легированные стали, например 12Х18Н9Т и ШХ15, показали хорошую упрочняемость с приростом твердости до 30 %. При этом особенно большая степень упрочнения отмечалась у аустенитных сталей: в 1,8–2,35 раза.

Обработку ППД можно рекомендовать для повышения усталостной прочности деталей из ковкого и высокопрочного чугуна с шаровидным

графитом. Для серых чугунов такая технология упрочнения не применяется, так как у них практически отсутствует пластичность. Обработка ППД галтелей коленчатых валов дизелей, которые изготавливают из высокопрочного чугуна и подвергают азотированию на глубину 0,7–0,9 мм, позволила значительно повысить эксплуатационные показатели валов. Азотирование само по себе повышает усталостную прочность стали на 25–30 %, а ППД до и после азотирования позволяет увеличить усталостную прочность до 60–70 % [3].

Применение ППД повышает поверхностную твердость деталей, увеличивает пределы текучести и упругости металла, формирует в поверхностных слоях остаточные напряжения сжатия. В результате упрочнения возрастает усталостная прочность, что предотвращает поломки деталей, испытывающих высокие механические нагрузки при эксплуатации. Кроме того, уменьшается высота неровностей микрорельефа обработанной поверхности, выступы становятся более плавными, а это сопровождается увеличением площади контакта в подвижных сопряжениях деталей, улучшением прирабатываемости деталей, сохранением точности посадок после приработки. В процессе ППД происходит также завальцовывание пор, микротрещин и микронадрывов в поверхностном слое металла глубиной до 2–5 мкм, что предотвращает возникновение или задерживает развитие усталостных трещин, а также повышает стойкость деталей к воздействию агрессивных сред.

Наиболее распространенными способами ППД являются обкатка роликами и шариками, ультразвуковое деформационное упрочнение, дробеструйная и гидроабразивная обработка, гидро- и виброгалтовка, алмазное выглаживание, чеканка и вибрационное обкатывание.

С использованием технологий ППД производят упрочнение пружин и рессор, зубчатых колес, коленчатых и шлицевых валов, шатунов, клапанов, гильз и блоков цилиндров двигателей внутреннего сгорания, лопаток турбин турбокомпрессоров и авиационных двигателей, трубопроводов, сварных швов и других деталей.

Повышение прочности металла после ППД связано с созданием в поверхностных слоях напряжений сжатия, сопровождается увеличением твердости и снижением пластичности, т.е. металл на поверхности переходит в состояние деформационного упрочнения, которое получило название наклепа.

Чрезмерно высокое давление при ППД, увеличение числа проходов при накатывании или раскатывании, а также увеличение длительности упрочнения при объемных способах ППД (дробеструйная, гидродробеметная, гидро-и виброгалтовка, чеканка и вибрационная обкатка) могут привести к перенаклепу, который сопровождается снижением напряжений в поверхностном слое, разрыхлением металла, появлением микротрещин с дальнейшим отделением (шелушением) частиц (чешуек) металла с поверхностей деталей, что резко снижает их эксплуатационные характеристики.

На рис. 1 приведены схемы упрочнения поверхностей деталей пластическим деформированием роликами или шариками путем накатывания валов, галтелей, впадин шлицев и раскатывания отверстий.

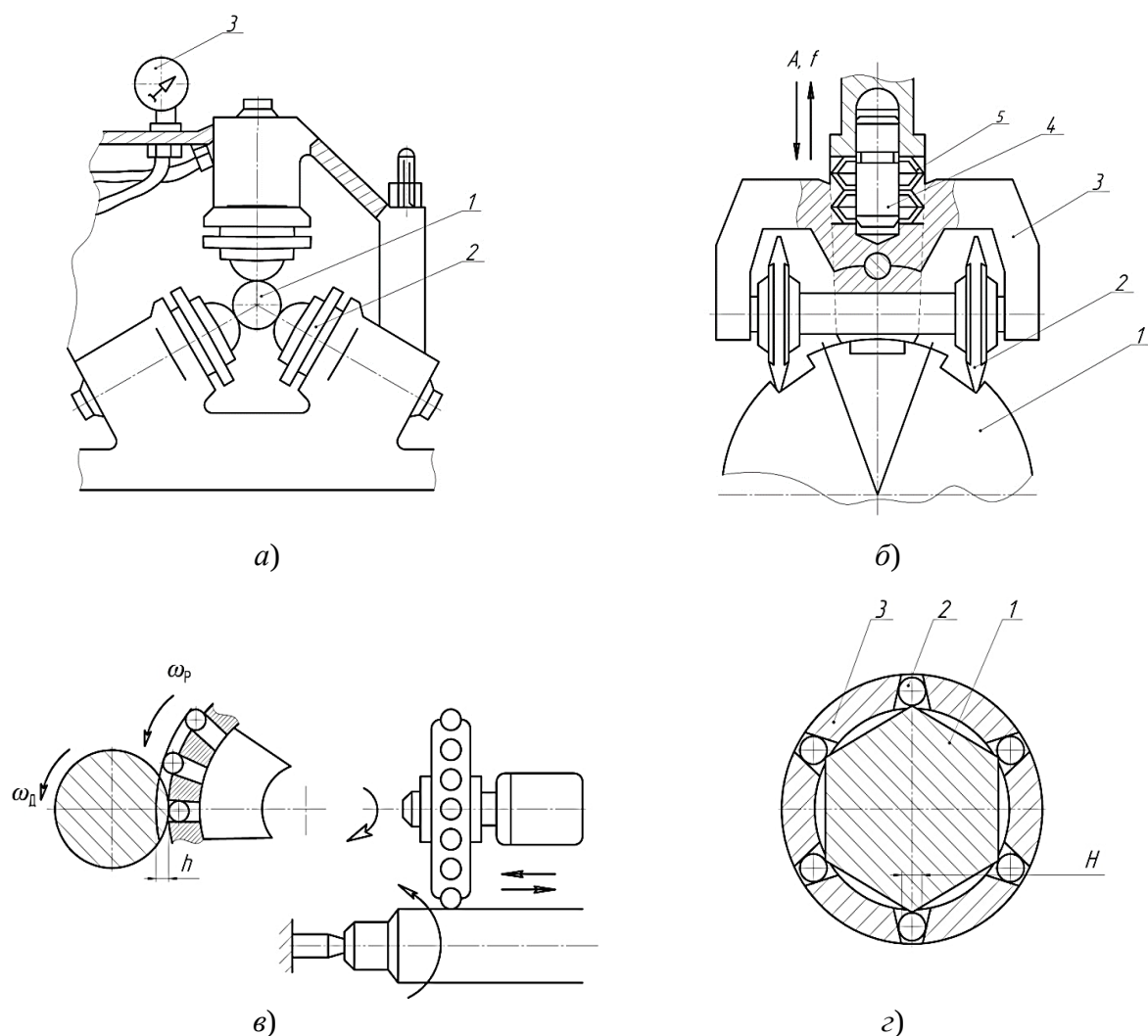


Рис. 1. Схемы поверхностного пластического деформирования деталей:

а – накатывание валов и галтелей роликами или шариками;

б – накатка или чеканка впадин шлицев;

в – центробежное накатывание ротационными накатниками;

г – раскатывание отверстий ударными раскатниками

Накатывание цилиндрических поверхностей валов 1 (рис. 1, а) или галтелей производится тремя головками, в которых установлены накатные ролики или шарики. Усилие накатывания создается гидродвигателем, встроенным в верхнюю головку. Давление, создаваемое гидросистемой станка, контролируется по показаниям манометра 3 и регулируется дроссельным устройством. Силы прижима накатных элементов создаются в одной плоскости и замыкаются на детали, что предотвращает деформации (коробление) нежестких валов. Накатные головки установлены под углом 120° относительно друг друга.

Накатка впадин шлицев валов 1 (рис. 1, б) осуществляется одновременно двумя профильными роликами 2 после закалки шлицевых поверхностей валов токами высокой частоты. Накатные ролики установлены в кронштейне 3 с возможностью вращения на общей оси. Корпус кронштейна 3 посредством муфты 4 с пружиной 5 соединен со штоком гидродвигателя, в полости которого подают статическое или пульсирующее давление. При статическом давлении шлицы упрочняют накаткой, а при пульсирующем давлении осуществляется виброгидравлическая чеканка впадин шлицев вала с нанесением 10–20 ударов на один миллиметр длины шлица. Маленькая площадь контакта ролика позволяет создать большую энергию удара на единицу площади поверхности. Степень наклепа при этом достигает 30–50 %, а глубина – нескольких миллиметров. Долговечность деталей увеличивается в 1,5 раза и более.

Для увеличения контактного давления на обрабатываемые поверхности валов используют также ротационные накатники (рис. 1, в), которые создают динамическое (ударное) воздействие шариков или роликов, свободно установленных в радиальных отверстиях или пазах ротора, вращающегося со скоростью, сопоставимой со скоростью шлифовального круга. Для увеличения силы удара валу сообщают вращение в направлении, противоположном вращению ротора со скоростью 30–90 м/мин. С увеличением диаметра шариков или роликов и величины h их выхода из сепаратора возрастает сила удара упрочняющих рабочих тел и степень наклепа поверхности. До 30–40 % увеличивается поверхностная твердость и до величины $Ra = 0,2–0,08$ мкм снижается шероховатость поверхности. Процесс отличается высокой производительностью и успешно конкурирует со шлифованием, которое нарушает структурную однородность поверхностных слоев металла и нередко сопровождается прижогами или появлением микротрещин.

Раскатывание отверстий представляет собой более трудоемкую и сложную операцию по сравнению с упрочняющей обработкой наружных поверхностей. Наиболее эффективно для отверстий применение инструментов, в которых раскатывающее действие рабочих тел носит ударный характер (рис. 1, *з*). Динамический раскатник состоит из оправки 1, роликов или шариков 2 и сепаратора 3. Рабочую часть оправки выполняют в виде многогранника для шариков или на ней фрезеруют продольные рифления под ролики. Для динамического упрочнения внутренних поверхностей вращение сообщают детали или раскатнику. В момент контакта с вершинами многогранника ролики или шарики наносят на поверхности упрочняемого отверстия частые удары, которые приводят к упрочнению металла и снижению шероховатости поверхности. Плавность контакта инструмента с упрочняющими телами возрастает с увеличением количества граней оправки. Ширину дуги H между гранями, как правило, ограничивают величиной до 2 мм, так как в противном случае происходит увеличение времени контакта упрочняющих рабочих тел (особенно роликов) с обрабатываемой поверхностью, что недопустимо для тонкостенных деталей. Припуск на раскатывание составляет 3–6 мкм. Длительность обработки одного отверстия составляет 5–10 с. Микротвердость поверхности возрастает после динамического упрочнения до 20–30 %.

Для отделочно-упрочняющей обработки ППД деталей со сложной формой рабочей поверхности, таких как лопатки турбин турбокомпрессоров двигателей внутреннего сгорания, авиационных турбин, а также деталей газовой и водопроводной арматуры, автомобильной и мебельной фурнитуры, производство которых носит массовый характер, используют преимущественно объемные, галтовочные методы обработки. Из них наиболее широкое применение получили вибрационные и центробежные технологии, которые основаны на динамическом взаимодействии рабочих тел с обрабатываемыми поверхностями деталей под действием низкочастотных вибраций, сообщаемых камере с рабочей загрузкой, или инерционных сил, возникающих при планетарном движении барабанов с рабочей загрузкой.

Существенными недостатками этих технологий, ограничивающими возможности их применения в машиностроительном производстве, является отсутствие стабильности упрочнения и параметров микрорельефа поверхности вследствие неодинаковых условий динамического взаимодействия рабочих тел на обрабатываемые детали в объеме рабочей

загрузки вибрационной камеры или центробежного барабана в связи с образованием в них зон слабой интенсивности обработки или застойных зон, для устранения которых используют различные конструктивные решения и технологические приемы. Однако это приводит к усложнению конструкций вибрационных и центробежных станков и технологий обработки и не позволяет окончательно решить проблему неустойчивости. Нередко требуется производить сплошной контроль деталей, отбраковку и повторную обработку поверхностей с неудовлетворительным качеством, что неприемлемо для массового производства деталей.

Авторами разработаны новый способ и устройство для интенсификации объемных отделочно-упрочняющих технологических операций и достижения стабильного качества поверхности на всех участках сложного профиля деталей, в том числе из труднообрабатываемых, высокопрочных материалов [4]. Схема нового способа ППД приведена на рис. 2. Обрабатываемые детали (рис. 2, *а*), например лопатки турбин, и рабочую среду (деформирующие стальные полированные шарики) загружают в цилиндрические барабаны 2, заливают технологическую жидкость, герметично закрывают барабаны торцевыми крышками и сообщают им планетарное вращение с угловыми скоростями ω_6 вокруг собственных осей и переносное вращение с планшайбой (водилом) 3 со скоростью ω_n вокруг оси планшайбы. В корпусе планшайбы размещены зубчатые колеса планетарного механизма и смонтированы опоры валов, несущих барабаны. Планшайба 3 жестко соединена с корпусом траверсы 4. Вращение барабанам 2 сообщают через шкив 5, который клиноременной передачей кинематически связан со шкивом на валу электродвигателя устройства.

Угловые осциллирующие перемещения траверсы 4 передаются через зубчатое колесо 6, находящееся в зацеплении с зубчатой рейкой, выполненной на штоке гидродвигателя вибратора (на схеме не показаны). От шкива 5 вращение через вал 7, смонтированный в корпусе траверсы 4, и коническую передачу 8 передается на вал, несущий планшайбу, вращение которой обеспечивает переносное движение барабанов с угловой скоростью ω_n . Вращение барабанов вокруг собственных осей с угловыми скоростями ω_6 достигается за счет обката промежуточных колес 9 по центральному зубчатому 10 планетарному механизму, закрепленному на траверсе 4. При этом зубчатые колеса 11, жестко смонтированные на валах барабана и находящиеся в зацеплении с промежуточными зубчатыми колесами 9, обеспечивают вращение барабанов. Таким образом,

a – конструктивная схема устройства для отделочно-упрочняющей обработки со схемой действия сил на загрузку при угловых качаниях водила;
b – схема действия сил на рабочую загрузку в радиальном направлении при планетарном движении цилиндрических барабанов

Для выравнивания контактных давлений на различных участках сложного профиля фасонных деталей усложняют траекторию движения

рабочей загрузки путем придания ей дополнительного осевого импульса. В исследуемом способе барабанам, совершающим планетарное движение вокруг оси планшайбы, сообщают угловые колебания вокруг оси траверсы с частотой ν . В результате рабочая загрузка в барабанах будет циклически перемещаться вдоль осей барабанов по сложной винтовой траектории, что приводит к интенсивному относительному перемещению поверхностей деталей и рабочих тел с одновременным разрушением зоны застоя (показана пунктиром на рис. 2, б).

При назначении режимов отделочно-упрочняющей обработки необходимо предотвратить смещение всей массы загрузки к торцевым стенкам цилиндрических барабанов под действием осевого импульса, вызванного угловыми колебаниями, так как при этом будут нарушены условия формирования скользящего слоя, в котором происходит наиболее интенсивное взаимодействие рабочих тел с поверхностями обрабатываемых деталей, а следовательно, произойдет резкое снижение эффективности обработки и качества поверхностного слоя. Установлено, что допустимая величина углового смещения β поверхности уплотненной загрузки к торцевым стенкам барабана составляет 40–60°.

Схема действия инерционных сил на компоненты рабочей загрузки при планетарном вращении барабана показана на рис. 2. Определим влияние угловых скоростей вращения барабанов ω_b , планшайбы (води́ла) ω_n и угловых качательных перемещений ν барабанов с планшайбой на величину угла β .

На произвольное рабочее тело массой m в точке М на стенке барабана (см. рис. 2, б) действуют следующие силы: N – реакция стенки барабана (направлена по нормали к касательной в точке М, т.е. к оси О барабана); $F_T = Nf$ – сила трения, которая перемещает прилегающий к стенке барабана слой загрузки; $F_{и}^{\omega_n} = m r \omega_n^2$ – центробежная сила инерции от вращения планшайбы ($r = O_1M$ – радиус); $F_{и}^{\omega_b} = m \cdot \frac{D}{2} \cdot \omega_b^2$ – центробежная сила инерции от вращения барабана (D – внутренний диаметр барабана); $F_{и}^K = 2m v_r \omega_n$ – кориолисова сила инерции ($v_r = \omega_b \frac{D}{2}$ – скорость движения рабочего тела со стенкой барабана).

Эти силы действуют на рабочую загрузку в радиальном сечении А-А барабана. При этом вращение води́ла (планшайбы) со скоростью ω_n приводит к уплотнению рабочей загрузки на стенке барабана и формирует ее в форму сегмента в полости барабана. Вращение барабана

вокруг собственной оси со скоростью ω_6 приводит к смещению уплотненной загрузки на некоторый угол в направлении движения барабана. Достигнув точки А, компоненты рабочей загрузки под действием сил $F_{\text{и}}^{\omega_{\text{п}}}$ и $F_{\text{и}}^{\text{к}}$ отрываются от стенки барабана и с высокой скоростью перемещаются по поверхности уплотненной загрузки к первоначальному устойчивому положению, образуя так называемый скользящий слой глубиной l , что приводит к циркуляции рабочей загрузки в объеме барабана вокруг центра масс, вблизи которого образуется зона относительного покоя, называемая застойной зоной. Детали, оказавшиеся в этой зоне, практически не обрабатываются.

Для устранения застойной зоны барабанам совместно с планшайбой сообщают угловые качательные движения со скоростью v , которые приводят к появлению центробежной силы инерции $F_{\text{и}}^v$, направленной вдоль оси барабана (см. рис. 2, а). Величину этой силы, направленной противоположно силе тяжести G (при вертикальном положении барабана) найдем по формуле

$$F_{\text{и}}^v = m v_{\text{м}}^2 r_v,$$

где $v_{\text{м}}$ – максимальная скорость угловых качательных перемещений (колебаний) барабана с планшайбой; r_v – расстояние от произвольного рабочего тела в точке М до оси угловых качаний планшайбы с барабаном.

Сила тяжести рабочего тела $G = mg$ (g – ускорение свободного падения).

Построив прямоугольник вышеперечисленных сил в проекции на плоскость, проходящую через оси барабана и планшайбы, представим угол наклона α равнодействующей силы R к торцевой стенке цилиндрического барабана в виде

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{F_{\text{и}}^v - G}{F_{\text{и}}^{\omega_{\text{п}}} - F_{\text{и}}^{\omega_6} - F_{\text{и}}^{\text{к}}},$$

или

$$\alpha = \arctg \frac{v_{\text{м}}^2 r_v - g}{\omega_{\text{п}}^2 (L + 0.5D) + 0.5\omega_6^2 D - \omega_{\text{п}}\omega_6 D}.$$

Учитывая, что равнодействующая сила R направлена по нормали к поверхности уплотненной загрузки (в осевом сечении барабана), найдем угол наклона β поверхности рабочей загрузки к торцевой стенке барабана:

$$\beta = \frac{\pi}{2} - \alpha = \frac{\pi}{2} - \arctg \frac{v_{\text{м}}^2 r_v - g}{\omega_{\text{п}}^2 (L + 0.5D) + 0.5\omega_6^2 D - \omega_{\text{п}}\omega_6 D}.$$

Полученное выражение позволяет по величине угла наклона β определить допустимое значение осевого импульса, сообщаемого рабочей нагрузке от угловых осцилляций барабана с планшайбой, в зависимости от технологических факторов ω_n и ω_b для заданных конструктивных параметров L, D, r_v центробежного устройства, что необходимо учитывать при назначении режимов упрочнения.

Библиографический список

1. Кудрявцев И.В. Современное состояние и перспективы развития методов повышения прочности и долговечности деталей машин поверхностным пластическим деформированием // Вестник машиностроения. 1970. №1. С. 93.
2. Папшев Д.Д. Отделочно-упрочняющая обработка поверхностным пластическим деформированием. М.: Машиностроение, 1978. 152 с.
3. Школьник Л.М., Шахов В.И., Щетинин Д.Д. Упрочнение крупногабаритных коленчатых валов // Вестник машиностроения. 1965. № 12. С. 45–48.
4. Патент 2782589 С1 Российская Федерация, МПК В24В 31/02. Способ и устройство для отделочно-упрочняющей центробежной обработки поверхностей деталей / В.З. Зверовщиков, А.Е. Зверовщиков, С.А. Нестеров, А.В. Зверовщиков, Р.А. Агальцов, А.Ю. Бутузов; заявка № 2021133367; заявл. 30.10.21; опубл. 31.10.2022. Бюл. № 31.

УДК 621.762.227

ОСОБЕННОСТИ ЛАЗЕРНОЙ СВАРКИ ДЕТАЛЕЙ, ИЗГОТОВЛЕННЫХ ИЗ ПОРОШКОВОГО СПЛАВА ЭК-61 МЕТОДОМ ПРЯМОГО ЛАЗЕРНОГО ВЫРАЩИВАНИЯ

Р.А. Латыпов, Д.К. Старовойтов
Московский политехнический университет
г. Москва, Россия

Представлены результаты исследований влияния режимов лазерной сварки в защитном газе на физико-механические свойства изделий, изготовленных методом прямого лазерного выращивания из порошкового