

Мировой опыт в исследовании и применении технологического процесса лазерной ударной обработки металлов (обзор)

Новиков И.А., Ножницкий Ю.А., Шibaев С.А.

Центральный институт авиационного моторостроения им. П.И. Баранова, г. Москва

e-mail: ianovikov@ciam.ru

Описаны физика и классификация технологических процессов лазерной ударной обработки (ЛУО), области применения ЛУО в авиационной промышленности, основные результаты теоретических и экспериментальных исследований ЛУО, выполненных в последние годы, и математические модели ЛУО.

Ключевые слова: лазерная ударная обработка, поверхностное упрочнение, остаточные напряжения, плазма, усталость, повреждение посторонним предметом, математическая модель, нестационарная задача, явный метод интегрирования, неявный метод интегрирования, собственные деформации

International experience in research and application of the technological process of laser shock peening of metals (review)

Novikov I.A., Nozhnitsky Yu.A., Shibaev S.A.

CIAM, Moscow

This study describes physics and classification of technological processes of laser shock peening (LSP), areas of application of LSP in the aviation industry, main results of theoretical and experimental studies of LSP carried out in recent years, and mathematical models of LSP.

Keywords: laser shock peening, surface hardening, residual stress, plasma, fatigue, foreign object damage, mathematical model, unsteady problem, explicit dynamics, implicit dynamics, eigenstrain

Введение

Настоящий обзор содержит краткие систематизированные сведения, необходимые для формирования представления о процессе лазерной ударной обработки (ЛУО). Обзор сфокусирован на работах, посвященных исследованию самого процесса и лишь вскользь затрагивает вопросы влияния ЛУО на разные характеристики обрабатываемых деталей. Дополнительные сведения об истории разработки этого способа упрочнения, о физических законах, лежащих в основе процесса, о влиянии ЛУО на отдельные характеристики материалов и деталей приведены в обзорных работах [1–7]. Стоит отметить, что в последние годы вышло чрезвычайно большое количество публикаций о ЛУО. В то же время современного обзора этих работ на русском языке, а также

обзора способов математического моделирования ЛУО найти не удалось.

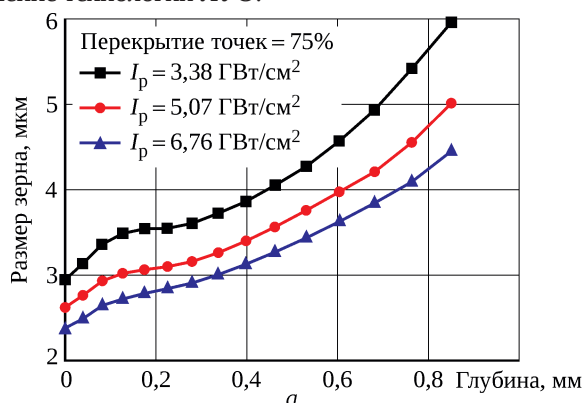
ЛУО является одним из видов поверхностно-пластического деформирования (ППД). Цель ЛУО, как и любого другого вида ППД, заключается в создании в поверхностных слоях детали сжимающих остаточных напряжений, что увеличивает сопротивление появлению забоин и других поверхностных повреждений и сопротивление росту трещин от этих повреждений [2; 8–10], повышает сопротивление коррозии и изнашиванию [11; 12].

Изучать воздействие лазерного луча на поверхность металла начали в Советском Союзе в 1962...1963 годах [13]. В работе [13] впервые было показано, что испарение металлической поверхности под действием лазера может приводить к созданию облака плазмы под боль-

шим давлением. В дальнейшем было показано, что применение прозрачного слоя (понятие описано ниже) позволяет получать давление плазмы в несколько гигапаскалей [14], было изучено влияние различных свойств поглощающих поверхностей и прозрачных слоев на давление плазмы [15], были созданы аналитические и численные модели для расчета давления плазмы [16]. В 1990-е годы (незадолго до первого промышленного применения ЛУО) приступили к прогнозированию остаточных напряжений, создаваемых при ЛУО [17]. В начале 2000-х годов для этих целей начали применять конечно-элементный анализ [18; 19]. В дальнейшем изучались самые разные аспекты влияния ЛУО на детали машин и параметров ЛУО на результаты обработки. Работы были посвящены:

- оценке качества и микроструктуры получаемых поверхностей [11; 20–27];
- измерению остаточных напряжений и оценке сопротивления деталей и образцов усталости [8; 10; 28–35], в том числе при высоких температурах [36] и при наличии поверхностных механических повреждений [28; 37];
- измерению остаточных напряжений и оценке сопротивления деталей и образцов коррозии [11; 38–40];
- оценке скоростей роста трещин и изучению способов останова трещин с помощью ЛУО [9; 32; 33; 38; 41–46];
- оценке сопротивления деталей и образцов фреттинг-износу и фреттинг-усталости [12; 47];
- изучению влияния на результат ЛУО формы луча и распределения энергии в луче [48; 49];
- изучению влияния ЛУО на детали, изготовленные аддитивным способом [50–52];
- повышению качества ЛУО на основе косвенных измерений [53] и многим прочим вопросам.

Большое количество исследователей – сотрудников разных фирм США (прежде всего GEAE, LSPT, CWST, LLNL, MIC), Японии (Toshiba) и других стран создавали и совершенствовали промышленное оборудование и технологические процессы, что обусловило широкое применение технологии ЛУО.



Общие сведения о влиянии ЛУО на свойства деталей

Говоря о преимуществах ЛУО, ее, как правило, сравнивают с дробеструйной обработкой [8; 9; 28; 29; 54–58], как с наиболее массово применяемым способом ППД, однако существуют работы по сравнению ЛУО и с другими способами ППД [29; 58]. Обработанные с помощью ЛУО детали в большинстве случаев оказываются более долговечными, чем детали, обработанные с помощью дроби [28; 55], шероховатость обработанной поверхности оказывается ниже [59], а глубина залегания остаточных напряжений – больше (более 1 мм против ~0,25 мм [60]). При этом при одинаковой интенсивности обработки остаточные напряжения на поверхности обработанной лазерным ударом детали оказываются такими же или ниже, чем при дробеструйной обработке [29; 54]. В литературе отмечается близость результатов, полученных посредством ЛУО и малопластического выглаживания (low plasticity burnishing) [58]. Главные же преимущества ЛУО – стабильность получаемых свойств, настраиваемость технологического процесса, а также возможность обработки поверхностей сложной геометрической формы, например пазов замковых соединений [59; 61], зон малого размера [18].

ЛУО, как и другие виды ППД, рассматривают в первую очередь применительно к проблемам усталости. На циклическую долговечность деталей влияют многие факторы. Среди них можно выделить влияние микроструктуры (размер зерна и плотность дефектов) и остаточных напряжений. Чем выше плотность дефектов, тем сопротивление усталости хуже; чем меньше размер зерна и больше сжимающие остаточные напряжения, тем сопротивление усталости лучше [62]. ЛУО существенно изменяет структуру материала – сильно повышает плотность дефектов, но вместе с тем измельчает зерно и создает сжимающие остаточные напряжения (рис. 1), что в подавляющем большинстве случаев увеличивает долговечность обработанного образца. Возрастает также циклическая долговечность лопатки,

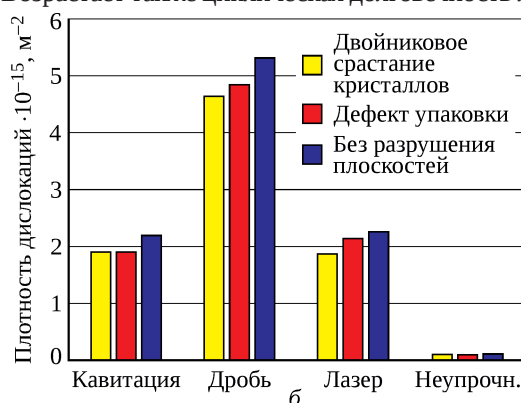


Рис. 1. Размеры зерен при ЛУО [26] (а) и сравнение получаемых разными методами ППД плотностей дислокаций [29] (б)

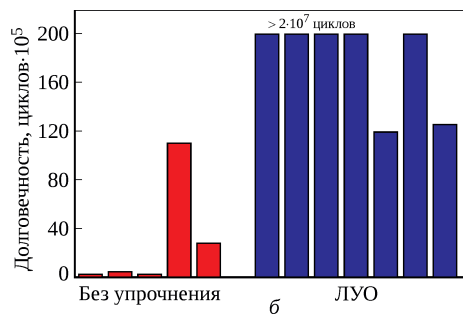
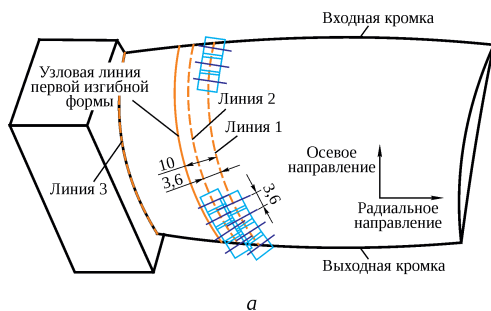


Рис. 2. Пример влияния ЛУО на циклическую долговечность титановой лопатки компрессора [10]:
 а – лопатка и зона обработки; б – результаты испытаний на вибростенде, переменные напряжения $\sigma_a = 480$ МПа, коэффициент асимметрии $R = 0,1$

подвергнутой повреждению посторонним предметом, и в ряде случаев без повреждения (рис. 2) [10]. В очень редких случаях долговечность обработанного лазерным ударом образца может снизиться по сравнению с исходной, но это происходит только на экстремальных режимах обработки (при которых очень высока получаемая плотность дефектов) и при нагружении в зоне сверхмногоциклового усталости (рис. 3, ЛУО 1 и ЛУО 3 – 1 и 3 импульса на точку) [30].

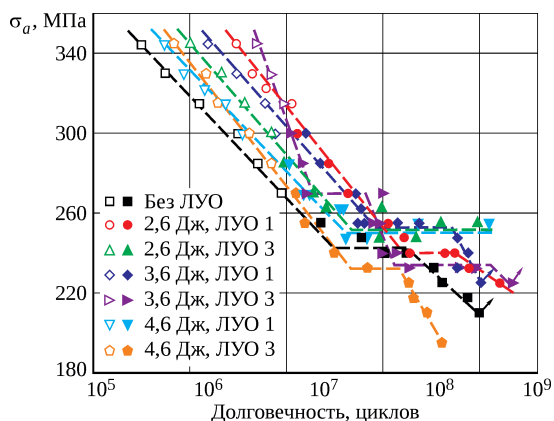


Рис. 3. Кривые усталости образцов, подвергнутых ЛУО, $R = 0,1$ [30]:
 пустые символы – поверхность;
 закрасненные символы – под поверхностью;
 стрелки – нет разрушения

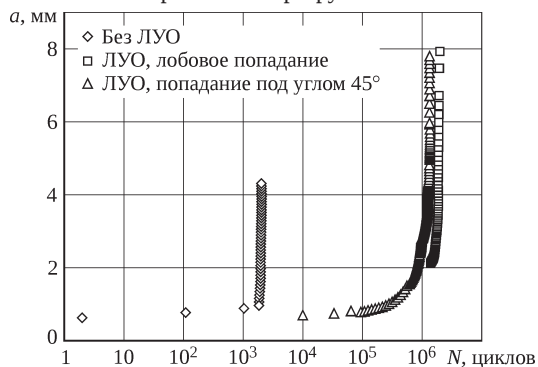


Рис. 4. Продвижение усталостной трещины в подвергнутом повреждению посторонним предметом образце, имитирующем профиль лопатки [44]

Сжимающие остаточные напряжения способны замедлить рост усталостных трещин, в том числе образованных вследствие повреждения лопатки попавшим в газозвдушной тракт двигателя посторонним предметом [44] (рис. 4).

С замедленным ростом трещин связано также замедленное коррозионное растрескивание обработанных лазерным ударом поверхностей [40].

Дополнительные сведения о влиянии ЛУО на свойства обработанных поверхностей можно найти в работах [1–7].

Применение ЛУО в авиационной промышленности

Первое и основное промышленное применение ЛУО связано с повышением сопротивления деталей многоциклового усталости (МнЦУ). Она является основной причиной разрушения детали авиационных двигателей в процессе эксплуатации, приводит к значительным эксплуатационным затратам и снижает готовность техники [63]. МнЦУ подвержены многие детали авиадвигателя. Разрушению от МнЦУ способствуют поверхностные повреждения деталей попадающими в газозвдушной тракт двигателя предметами, фреттинг в условно неподвижных соединениях, коррозия, накопление повреждений от малоциклового усталости (МЦУ), производственные отклонения и другие факторы. Уровень действующих в детали вибрационных напряжений и сопротивление МнЦУ зависят от большого количества факторов. Это обуславливает сложность прогнозирования вибрационной прочности деталей двигателей. При разрушении лопаток компрессора возможно застревание фрагментов лопатки в радиальном зазоре компрессора, которое может привести к опасному титановому пожару [64].

Проблема МнЦУ особенно актуальна для одномоторных летательных аппаратов, так как разрушение лопатки компрессора от МнЦУ при повреждении посторонним предметом является частой причиной выключе-

чения двигателя в полете (8...14 случаев на 100 000 ч полета для авиации США [65]), в то время как любое вызванное отказом выключение двигателя в полете недопустимо для одномоторного летательного аппарата (в случае одномоторного F-16 отказ двигателя приводит к потере самолета примерно в 80...90% случаев) [63]. При создании перспективных двигателей проблемы предотвращения разрушения деталей от МнЦУ обостряются [66].

В 1994 году была инициирована и затем реализована многолетняя программа ВВС США по предотвращению разрушения деталей двигателей от МнЦУ [67]. Одним из важнейших достижений при выполнении этой программы является внедрение в авиадвигателестроение технологии ЛУО, которая впоследствии стала применяться для упрочнения различных узлов летательных аппаратов, а также была внедрена в других отраслях промышленности – медицинской (проблема МЦУ и МнЦУ характерна для протезов суставов), автомобильной (валы, зубчатые передачи), судостроительной (корпуса) и других [68–70].

Начиная с 1970-х годов было запатентовано большое количество изобретений в области ЛУО, что свидетельствует об очень большом экономическом потенциале технологии [18] и большом спектре применения.

В авиастроении лазерному ударному упрочнению, как правило, подвергают лопатки компрессоров газотурбинных двигателей [2; 8], контактные поверхности замковых соединений компрессоров [61], несущие детали планеров [71], элементы зубчатых передач [72; 73].

Обработка профильных частей лопаток компрессоров обычно производится вдоль кромок для улучшения циклической долговечности при появлении забоин [28]. Одной из целей внедрения ЛУО в соответствии с про-

граммой ВВС США было увеличение допустимого для продолжения эксплуатации размера забоины кромки лопатки вентилятора в 15 раз [67]. ЛУО оказывается полезной и при работе деталей в условиях сверхмногоциклового усталости [30], что актуально для перспективных двигателей.

Первое промышленное применение ЛУО связано именно с обработкой кромок лопаток для предотвращения разрушений лопаток компрессора от повреждения посторонними предметами – на двигателях GE F101 самолетов B-1B Lancer с 1997 года, для чего была создана компания Laser Shock Peening Technologies Inc. Применение ЛУО позволило к 2003 году сэкономить 59 млн долларов на заменах лопаток и устранении вторичных повреждений двигателей. Также, по оценкам специалистов, применение ЛУО позволило сэкономить около 40 млн долларов, предотвратив опасные отказы. Удачный опыт применения ЛУО на двигателях F101 (рис. 5) подтолкнул промышленность к применению лазерного удара на других серийных изделиях авиационной техники [72].

К 2008 году фирма GEAF провела упрочнение более 100 000 лопаток двигателей ВВС США. ЛУО также была использована для упрочнения лопаток блиска первой ступени вентилятора двигателя F110-GE-132. В 2003 году ЛУО была успешно внедрена для упрочнения лопаток блиска двигателя F119-PW-100 для самолета F/A-22 [72]. По оценкам [72], общий эффект от использования ЛУО на всех авиационных двигателях парка ВВС США мог составить 1 млрд долларов. Применение ЛУО рекомендовано военным стандартом США по конструкционной прочности авиационных двигателей [74]. Высокой эффективности ЛУО ожидали при применении для упрочнения сварных деталей из титановых

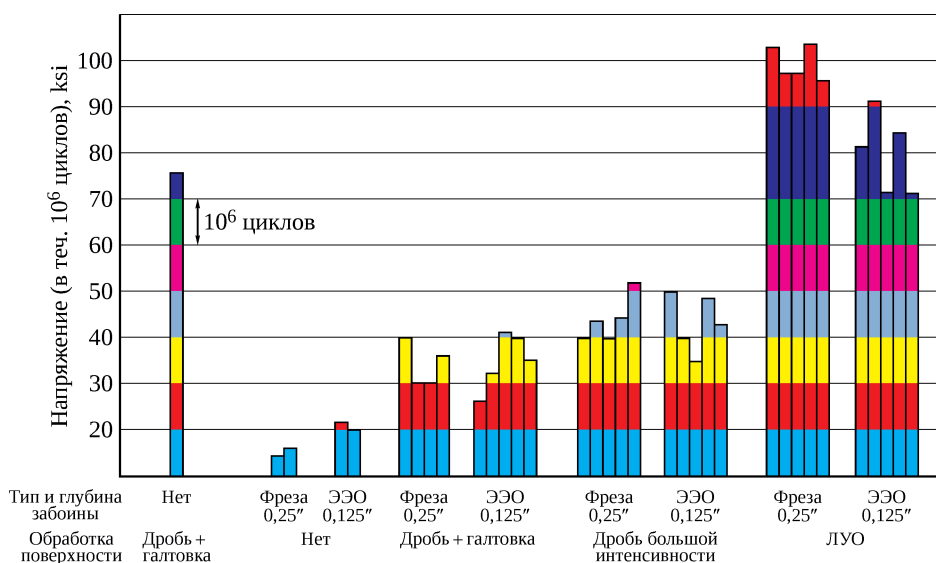


Рис. 5. Долговечность лопаток вентилятора двигателя F101 с забоинами при ступенчатом повышении нагрузки [72] (ЭЭО – электроэрозионная обработка)

и алюминиевых сплавов; замены поковок более дешевыми отливками; для повышения надежности деталей стареющего парка; предотвращения усталостных разрушений, инициированных фреттингом и коррозией под напряжением; упрочнения крупногабаритных деталей (с помощью мобильных установок) и т.д. [72].

Сегодня ЛУО применяют на следующих серийно выпускаемых военных летательных аппаратах [72; 75]: на самолетах B-1B Lancer, F-22 Raptor, F-35 Lightning II, F-16 Falcon; на вертолетах Apache, Chinook, Blackhawk, RAH-66. Также известно о применении ЛУО в гражданских двухконтурных турбореактивных двигателях Trent 500, Trent 800, Trent 1000, Trent XWB, BR710, BR725, CFM56 [76; 77].

Обработка контактных поверхностей замковых соединений типа «ласточкин хвост», как на лопатках, так и на дисках [75], призвана отсрочить момент зарождения усталостной трещины, обусловленной фреттинг-усталостью [63], и замедлить ее рост.

В силовых деталях планеров летательных аппаратов ЛУО подвергают зоны концентрации напряжений для повышения сопротивления МнЦУ [71; 78].

ЛУО применяют для повышения долговечности элементов трансмиссий, как двигателя, так летательного аппарата (в первую очередь, главных редукторов вертолетов) [72; 75].

На рис. 6 представлены некоторые вехи истории коммерческого применения технологии ЛУО.

Одна из проблем промышленного применения ЛУО – ее стоимость. Для решения этой проблемы с начала 2000-х годов ведутся работы по совершенствованию и автоматизации технологического процесса. Создание к 2008 году лазера четвертого поколения позволило сэкономить 1 млн долларов на каждой установке.

Компания LSPT Inc. разработала систему быстрого нанесения защитного слоя (понятие описано ниже), что позволило многократно повысить производительность системы [73].

ЛУО также применяют для высокоточной формовки деталей и исправления формы деталей [8; 79]. Применение лазерного удара в этом случае позволяет избавиться от необходимости проектирования и изготовления штамповочной или гибочной оснастки.

В последние годы становится популярным объединение технологий ЛУО и селективного лазерного плавления (метод 3D-печати). Получаемые с помощью аддитивных технологий материалы имеют высокую пористость, что негативно сказывается на их прочностных свойствах. Выявляются также поверхностные растягивающие напряжения, подповерхностные дефекты, повышенная шероховатость поверхности, что также может снизить сопротивление МнЦУ. Обработка же детали лазерным ударом, в том числе после сплавления каждого нескольких слоев, позволяет существенно улучшить характеристики материала [50; 52; 80].

Есть попытки оптимизировать технологию поверхностного упрочнения путем сочетания обдувки шариками и ЛУО [28].

Практического применения ЛУО к деталям горячей части газотурбинного двигателя пока не встречалось ввиду того, что наведенные обычным ЛУО остаточные напряжения быстро релаксируют под действием высоких температур, однако ведутся работы по созданию технологии горячей ЛУО, при которой создаются гораздо более устойчивые структуры материала и более устойчивые остаточные напряжения [81].

ЛУО можно применять для ремонта лопаток компрессоров ГТД и деталей планера самолета – при выяв-



Рис. 6. Основные этапы коммерческого применения ЛУО [69]

лении трещины. Обработка области трещины лазерным ударом способствует формированию сжимающих остаточных напряжений, что позволяет остановить или сильно замедлить рост трещины [41]. Существует также технология, совмещающая лазерную наплавку с последующей ЛУО [82]. Для осуществления быстрого ремонта создаются портативные маломощные установки, первые экземпляры которых уже введены в эксплуатацию [83; 84].

Ввиду специфики деталей, для которых в основном применяют ЛУО, большинство исследований сосредоточено на двух группах сплавов – титановых и алюминиевых, однако ведутся работы по изучению воздействия лазерного удара и на детали из сплавов других групп, например жаропрочных никелевых сплавов [85], магниевых сплавов [21; 86], сталей [55] и др.

Говоря об областях применения ЛУО, можно заключить, что этот вид обработки в теории может применяться везде, где стоят проблемы усталости и коррозии. В первую очередь, она может применяться там, где сейчас используется дробеструйная обработка.

Описание процесса ЛУО

Схематично процесс ЛУО показан на рис. 7. Луч лазера проходит сквозь прозрачный слой, почти не встречая сопротивления, и поглощается специальным темным (поглощающим) слоем. Так как импульс лазера передает поверхности очень большую мощность, происходит быстрое испарение и ионизация поглощающего и прозрачного слоев. Плазма быстро расширяется, воздействуя большим давлением на окружающие поверхности – поверхность прозрачного слоя с одной стороны и поверхность обрабатываемой детали (цели) – с другой, в результате чего в обрабатываемой поверхности создается ударная волна. Эта волна порождает пластическое деформирование металла и, как следствие, остаточные напряжения, так же как это происходит при использовании других способов ППД.

Процесс имеет множество подвидов, каждый из которых имеет свою область применения, свои преимущества и недостатки. Можно выделить следующие классификации ЛУО:

- холодная, горячая [22; 81] и криогенная [88] ЛУО. При горячей ЛУО обрабатываемая деталь нагревается до определенной температуры для того, чтобы добавить к наведению остаточных напряжений вызванное нагревом изменение структуры материала, при криогенной ЛУО обрабатываемая деталь находится в холодной жидкости;

- ЛУО с поглощающим покрытием и без него [20; 24]. При отсутствии поглощающего (защитного) слоя металл подвергается не только механическому дефор-

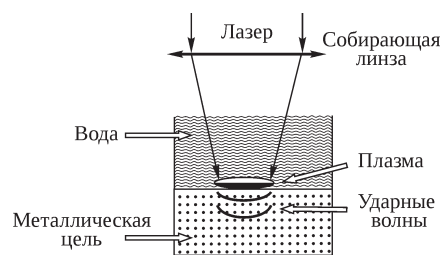


Рис. 7. Схематическое изображение процесса ЛУО [87]

мированию, но и тепловому, а также тепловому изменению структуры, что существенно меняет характер получаемых результатов [89];

- ЛУО с жидким или твердым прозрачным слоем. Первые исследования проводились при полном отсутствии прозрачного слоя [90], однако вскоре было показано, что наличие прозрачного слоя позволяет многократно увеличить пиковое давление плазмы [91]. Ввиду сложности практической реализации, ЛУО с твердым прозрачным слоем в промышленности не применяют. Еще одна причина широкого распространения воды в качестве прозрачного слоя заключается в том, что для воды порог оптического пробоя (явление описано далее) выше, чем для большинства кристаллических материалов (например, кварца) [92];

- ЛУО с погружением в воду и со слоем воды [11; 53; 88; 93]. В некоторых случаях вместо создания на обрабатываемой детали слоя воды (или другого прозрачного материала), всю деталь целиком погружают в воду. Обычно это делают при обработке без защитного слоя;

- ЛУО для упрочнения [2], для ремонта [82], для формовки [79] и т.д.

Сегодня в качестве поглощающего слоя используют виниловую изоляцию толщиной 0,1...0,25 мм в случае холодной ЛУО и алюминиевую фольгу толщиной около 70 мкм [94] в случае горячей ЛУО. В качестве прозрачного слоя применяют воду для холодной ЛУО и кремниевое масло для горячей ЛУО. Толщину прозрачного слоя выдерживают около 1,0...1,5 мм [95]. При ЛУО обычно применяют Nd:YAG-лазеры с модуляцией добротности (Q-switched). Используют различные гармоники с длиной волны 266, 532 или 1064 нм [96], чаще всего – вторую гармонику (зеленую) с длиной волны 532 нм [11; 97] и первую гармонику (инфракрасную) с длиной волны 1064 нм. Nd:YAG-лазеры применяются, в первую очередь, благодаря большей производительности, по сравнению с Nd:glass-лазерами [5]. Для повышения надежности и ресурса системы иногда используют Nd:YLF-лазеры. Плотность мощности сфокусированного луча обычно составляет 3...10 ГВт/см² [56]. Продолжительность импульса, как правило, составляет от трех до нескольких десятков наносекунд [98], однако исследуются процессы ЛУО с использованием и фемтосекундных лазеров [99; 100], которые больше подходят

для применения в микроэлектромеханических компонентах (MEMS). В общем случае глубина залегания остаточных напряжений и величина пиковых остаточных напряжений растут с увеличением продолжительности импульса.

Физические основы процесса ЛУО

Лазерная ударная обработка – сложный процесс, включающий в себя многие явления, рассматриваемые в разных областях физики. Теорию ЛУО можно разделить на два больших блока: процесс образования и расширения плазмы и процесс прохождения ударной волны внутри металла.

Поведение плазменного факела. Лазерный луч при ЛУО фокусируют таким образом, чтобы фокус находился за поверхностью обрабатываемого образца, а на самой поверхности диаметр луча составлял выбранную заранее величину. Минимально возможный диаметр луча ограничен. Во-первых, при уменьшении диаметра лазерного луча на поверхности образца при прочих равных условиях уменьшается глубина залегания остаточных на-

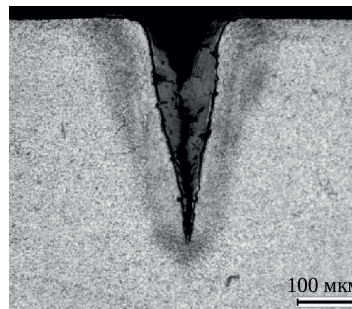


Рис. 8. Результат воздействия сфокусированного лазерного луча [102]

пряжений [101], а во-вторых, появляется риск «прострелить» образец, получив вместо пластически деформированной лунки глубокую обожженную пробоину. Пример воздействия сфокусированного лазерного луча на титановый сплав при закрытой абляции показан в [102] (рис. 8).

Плазменный факел образуется непосредственно на поверхности образца, расширяясь с течением времени. Наглядно процесс эволюции факела показан в [103] (рис. 9). В процессе явно выделены четыре этапа: нагрев

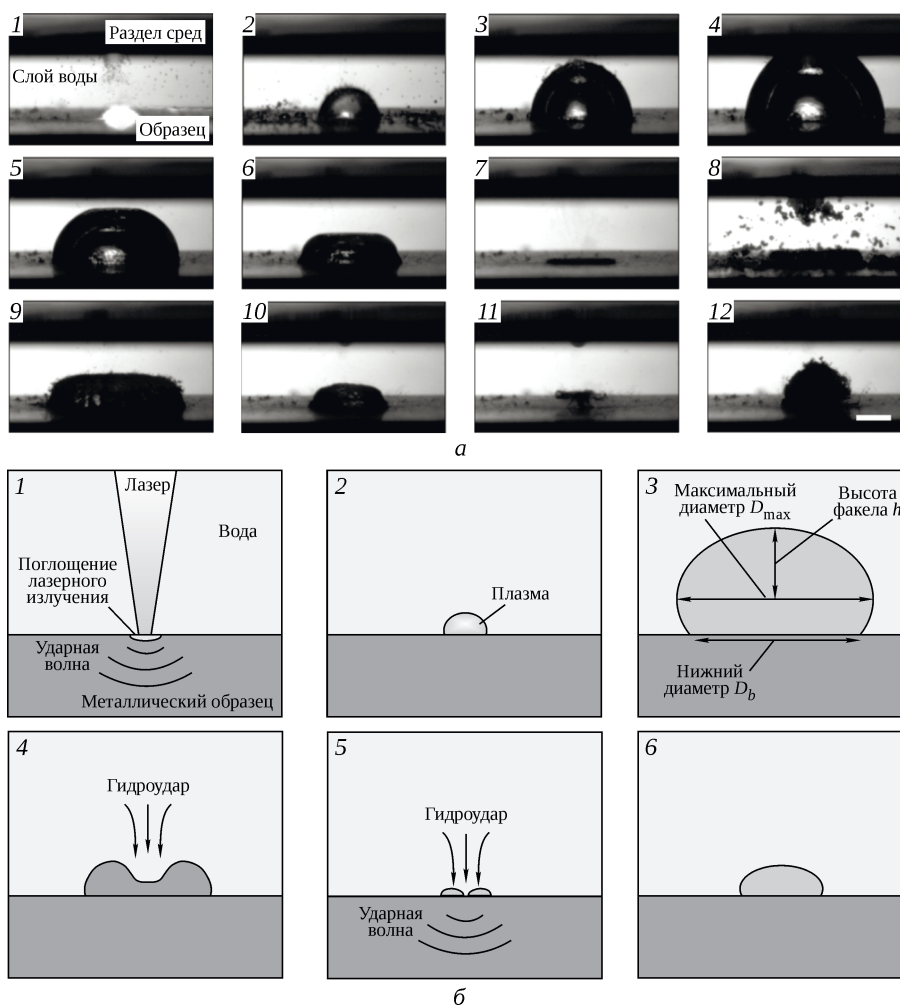


Рис. 9. Процесс эволюции плазменного факела (а) и схематизация процесса (б) [103]

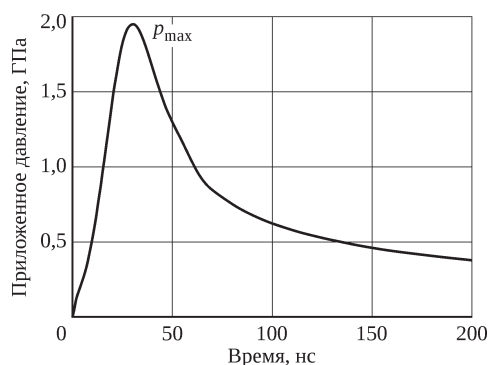


Рис. 10. Типичный профиль давления плазмы во времени [105]

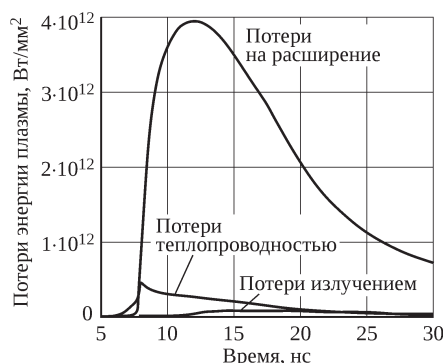


Рис. 11. Структура уменьшения внутренней энергии плазмы [106]

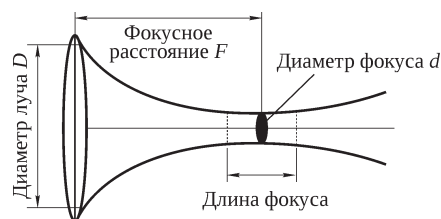


Рис. 12. Проход гауссова пучка когерентного излучения через собирающую линзу [107]

плазмы, адиабатическое расширение факела, сжатие факела окружающей водой, гидроудар по поверхности образца, формирующий вторичную ударную волну. Вторичные ударные волны формируются несколько раз с постепенно убывающей амплитудой.

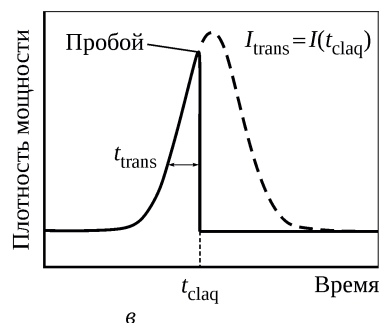
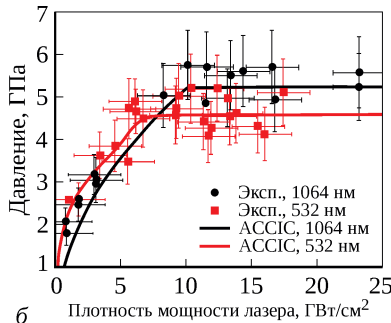
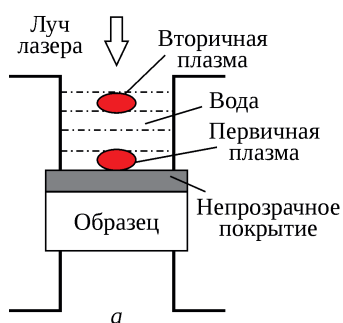


Рис. 13. Оптический пробой при ЛУО:

а – расположение вторичного плазменного факела [108]; б – насыщение пикового давления плазмы [97]; в – диаграмма передаваемой первичной плазме мощности [97]

На рис. 10 показана типичная диаграмма изменения давления в плазменном факеле с течением времени (результат математического моделирования). Давление в экспериментах измеряют косвенно с помощью пьезодатчиков [91] или системы VISAR (velocity interferometer system for any reflector) [87; 104]. Более подробно вопрос экспериментальных исследований процесса ЛУО будет рассмотрен в следующих параграфах.

Пик давления соответствует моменту окончания действия лазера. Как правило, процесс уменьшения давления занимает время гораздо большее, чем продолжительность импульса лазера.

Полученная плазмой от лазера энергия расходуется на совершение работы над окружающими телами и на теплообмен с ними. На рис. 11 показан пример типичной структуры уменьшения внутренней энергии плазмы.

Первоначальный диаметр лазерного луча, как правило, составляет около 10 мм. Чтобы достичь требуемой плотности мощности излучения, применяют собирающие линзы. Здесь стоит отметить, что гауссов пучок когерентного излучения, к которому по своей структуре близок луч лазера, ведет себя при прохождении линз не так, как обычный свет [107] (рис. 12), поэтому при расчете диаметра освещенного пятна нельзя пользоваться правилами геометрической оптики.

Использование собирающих линз приводит к тому, что пучок света получается сходящимся. Отраженные от поверхности поглощающего слоя лучи сходятся в мнимом фокусе на некотором расстоянии от поверхности поглощающего слоя, приводя к появлению второго плазменного факела в толще воды или даже воздуха. Будучи почти непрозрачной, плазма вторичного факела начинает поглощать значительную часть энергии лазера, приводя к тому, что повышение мощности лазера не вызывает дальнейшего повышения пикового давления первичной плазмы или даже приводит к его снижению [97; 108; 109] (рис. 13). Такое явление называют оптическим пробоем. Пробой может вызываться и первичным лучом лазера при достижении им некоторой пороговой мощности (обычно 8...10 ГВт/см²).

По причине опасности возникновения пробоев вода, используемая в качестве прозрачного слоя, должна быть деионизированной [110].

Ударная волна в металле и остаточные напряжения. Столь быстрое нагружение, как при ЛУО, приводит к тому, что в металле возникает ударная волна. Если давление за фронтом ударной волны превышает упругий предел Гюгонио (Hugoniot elastic limit, HEL), часть деформации носит необратимый характер, что приводит к формированию остаточных напряжений [111; 112]. Если же давление за фронтом, равное пиковому давлению плазмы, меньше HEL, то пластического деформирования металла не происходит – все деформации носят упругий характер. Для одноосного напряженного состояния, реализуемого при ЛУО, HEL линейно связан с динамическим пределом текучести [111]. По этой причине менее прочные алюминиевые сплавы легче поддаются ЛУО (требуют меньшей плотности мощности для создания тех же остаточных напряжений), чем более прочные титановые. Из сказанного выше следует, что ЛУО возможно только при превышении пикового давления плазмы над HEL. Так как предел текучести у пластически деформированного материала выше, чем у исходного недеформированного, многослойная ЛУО (когда на одну точку поверхности приходится несколько лазерных импульсов) имеет смысл только при наличии лазера достаточно мощного, чтобы давление плазмы превысило HEL для металла, деформированного предыдущим импульсом. При этом учитываются только напряжения и деформации в направлении перпендикулярном обрабатываемой поверхности.

Ударные волны имеют свойство отражаться от границ детали и взаимодействовать друг с другом. Это

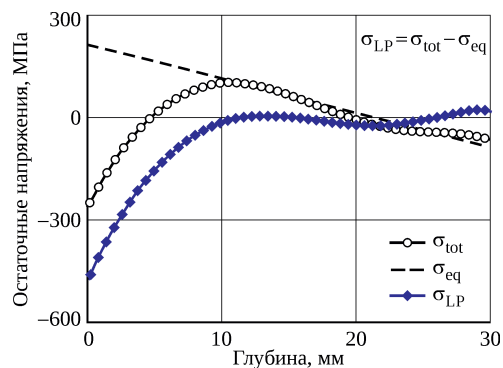


Рис. 14. Эпюры полного, уравнивающего и обусловленного ЛУО остаточного напряжения по толщине детали [113]

приводит к тому, что при обработке листовых материалов (например, кромок лопаток компрессоров) результат ЛУО будет отличаться от результата, полученного на том же материале, при тех же параметрах лазера и покрытий, но с большой толщиной детали. Результирующие пластические деформации и остаточные напряжения будут выше [60]. Изменение условий взаимодействия ударных волн с границами детали также приводит к изменению получаемой микроструктуры [21].

После того как ударные волны утихают, металл, не подвергшийся пластическому деформированию, пытается вернуться в первоначальную форму, но встречает сопротивление со стороны пластически деформированного металла. Это приводит к тому, что при ЛУО (как и при любом другом виде ППД) под слоем сжатого металла возникают слои с уравнивающими растягивающими напряжениями [113]. На рис. 14 приведен пример распределения остаточных напряжений после ЛУО по толщине образца и распределения уравни-

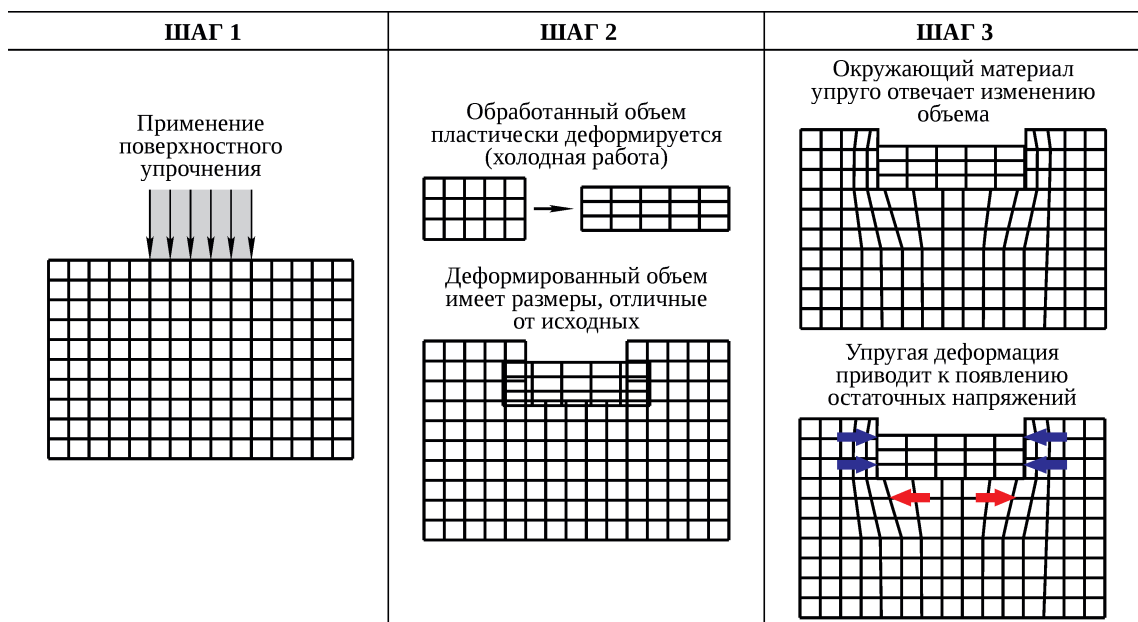


Рис. 15. Процесс наведения остаточных напряжений [114]

вающих упругих напряжений. На рис. 15 показан процесс создания остаточных напряжений.

Одна из главных задач при разработке технологического процесса ЛУО – не допустить образования зон растягивающих остаточных напряжений в критически важных местах детали.

Экспериментальные исследования процесса ЛУО

Можно выделить три основные группы экспериментальных работ, связанных с ЛУО: эксперименты с одиночным импульсом, направленным на тонкий (из фольги) образец (например, по определению давления в плазменном факеле и изучению оптического пробоя) [14; 56; 87; 91; 96; 98; 108; 115]; эксперименты по изучению последствий воздействия одиночного импульса на толстый образец (например, для сравнения разных покрытий) [20; 116; 117]; эксперименты с обработкой сплошных поверхностей посредством ЛУО (например, для оценки качества поверхности, остаточных напряжений, трещиностойкости или пределов выносливости) [8–11; 28; 30; 41; 42; 55; 113].

Эксперименты на тонких образцах. Как отмечалось выше, измерить профиль давления плазмы напрямую невозможно ввиду очень малой продолжительности процесса. Это давление определяют косвенно. Существует два основных способа получения профиля давле-

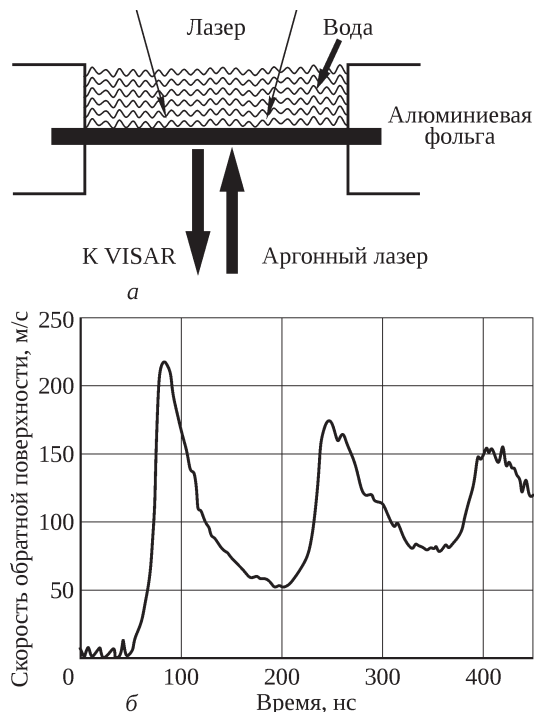


Рис. 16. Схема классического эксперимента по определению давления плазмы [87] (а) и получаемый в ходе этого эксперимента профиль скорости нижней поверхности фольги (б)

ния: с помощью системы VISAR [56; 87; 98] или с помощью пьезодатчиков [14; 91]. В обоих случаях образец представляет собой тонкий лист металла, ~0,5 мм. В случае использования интерферометра зависимость давления плазмы от времени получают пересчетом зависимости скорости нижней поверхности образца от времени [87] (рис. 16). В случае использования пьезодатчика первичный сигнал получают в виде функции электродвижущей силы на пьезодатчике от времени [91].

Эксперименты с изучением последствий воздействия единичных импульсов. Такие эксперименты проводят в основном для изучения различных прозрачных и защитных покрытий [20; 116]. С другой стороны, форма полученной отметины на металле может многое сказать о действовавшем импульсе давления, особенно при сопоставлении с конечно-элементным анализом [60; 117]. Авторы работы [60] использовали геометрию лунки для валидации своей конечно-элементной модели, а авторы [117] предложили способ вычисления профиля давления по форме лунки с помощью оптимизационных алгоритмов.

Используемые в таких экспериментах образцы должны быть достаточно большой толщины для того, чтобы отраженные от противоположного края образца ударные волны не исказили результаты. Рабочая поверхность образца должна быть хорошо обработана (желательно – отполирована) для обеспечения возможности получить качественную профилограмму поверхности после ударной обработки.

Эксперименты с обработкой поверхности. В эту категорию входят все типы экспериментов на упрочненных деталях и поверхностях. Работа непосредственно с установкой для ЛУО в этом случае не отличается от проводимой при серийном применении и в отдельном описании не нуждается. Кратко основные направления таких работ перечислены во введении к настоящему обзору.

Математическое моделирование процесса ЛУО

Одним из основных преимуществ ЛУО перед более традиционными видами поверхностного упрочнения называют предсказуемость и хорошую повторяемость результатов [1]. Для экстраполяции результатов обработки, полученных на образцах, на реальную геометрию и/или на другие материалы деталей и другие режимы обработки нужно иметь надежный способ расчетного прогнозирования параметров обработанной поверхности. В первую очередь, речь идет о прогнозировании остаточных напряжений.

Существует несколько типов математических моделей процессов, происходящих при ЛУО. Некоторые

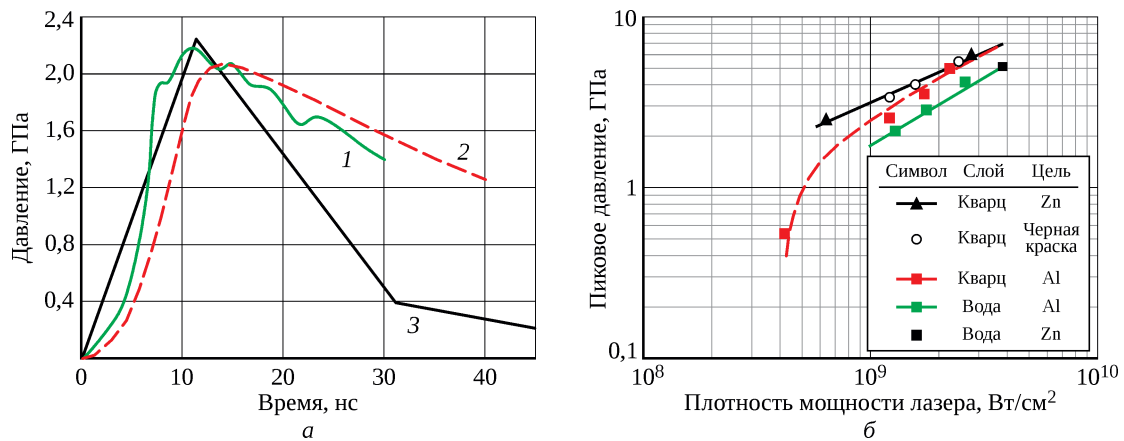


Рис. 17. Результаты работы кода LILA [16]:

а – профиль давления; б – прогнозирование пикового давления;

1 – измеренное давление; 2 – рассчитанное давление; 3 – импульс лазера (относительные единицы)

модели можно применять независимо от других, некоторые требуют последовательного применения с другими моделями.

Модели для расчета давления плазмы. Многие исследователи сосредотачивались на том, чтобы в явном виде теоретическими способами найти зависимость давления плазмы от времени. Как правило, эти способы используют одномерные термодинамические модели.

Одна из первых моделей плазменного факела, применяемая и в настоящее время [59], лежит в основе разработанного в 1970-е годы одномерного конечно-разностного кода LILA [16]. Модель позволяет оценивать профиль давления (рис. 17). Экспериментальные результаты (обозначены символами) были получены для идеального случая – образца-фольги с использованием

пьезодатчика. Исследуемый металл был нанесен слоем 7 мкм непосредственно на один из электродов датчика.

Авторы работы [91] предложили простую одномерную модель, применение которой на практике часто сводится к одной формуле для поиска максимального давления плазмы в зависимости от акустических свойств материалов цели и прозрачного покрытия и плотности мощности лазерного излучения (например, [82]). Тем не менее модель позволяет найти давление как функцию времени. При этом используются две величины, которые задаются на основе опыта: часть энергии, переходящая из лазерного излучения во внутреннюю энергию первичной плазмы (α), и толщина слоя плазмы в начальный момент времени (L_0). Показано, что величина α в широком диапазоне мощности лазерного луча равна

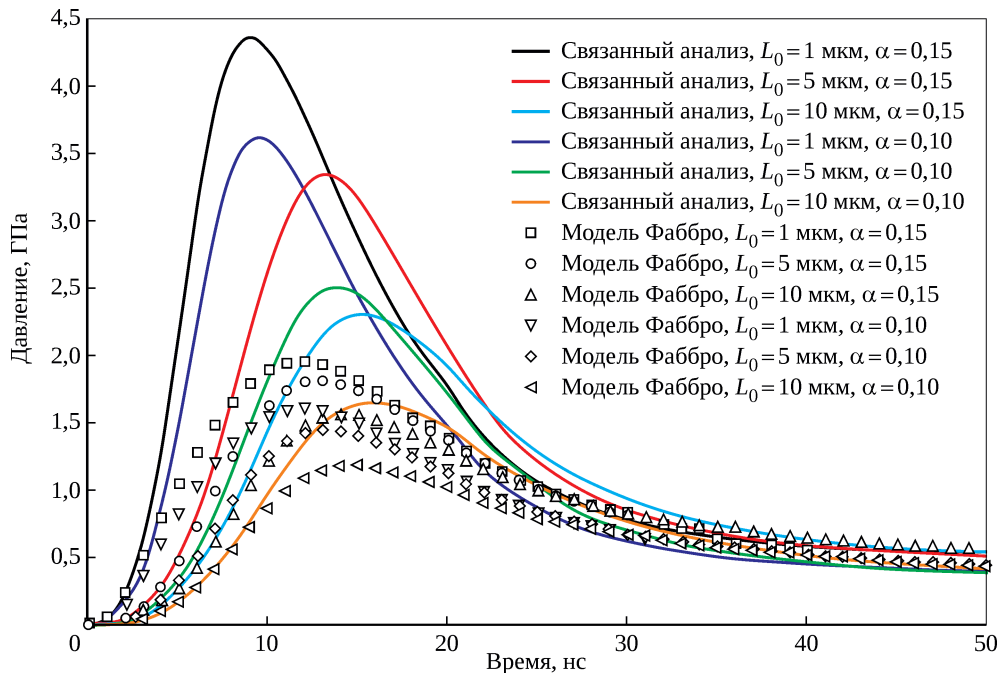


Рис. 18. Сравнение расчетных профилей давления плазмы по модели [91] и по модели [101], учитывающей в том числе пластичность цели

примерно 0,2...0,25 [17; 101]. Начальную толщину плазмы обычно назначают равной 1...10 мкм [101]. Эта модель так же, как и модель [16], не учитывает пластическое деформирование цели. Как показывают расчеты, пластическое поведение материала цели может влиять на расчетную величину пикового давления плазмы [101] (рис. 18).

Модель [101] будет рассмотрена ниже. Вскоре после публикации модели [91] была разработана аналитическая модель, учитывающая пластичность материала цели и позволяющая сразу оценить остаточные напряжения [17]. Модель [17] подходит только для оценки давления в пределах первого этапа эволюции плазмы (под действием лазерного луча).

Наиболее полную аналитическую модель эволюции плазменного факела на упругой цели создали авторы работы [106] (рис. 19). Модель представляет собой замкнутую систему алгебраических и дифференциальных

уравнений, которую авторы решали с помощью метода конечных объемов [118]. Как и описанные выше, эта модель является одномерной. Модель не учитывает пластическое деформирование цели. Модель была валидирована по экспериментам с тонкими образцами и системой VISAR [87; 119] (рис. 20).

При большой плотности мощности пиковые давления, получаемые при валидации модели [106], оказывались значительно больше экспериментальных. Первоначально это расхождение было объяснено пределами диапазона измерения давления, однако дальнейшие исследования показали, что расхождение связано с тем, что модель [106] не учитывает оптический пробой. Модель [106] была дополнена аналитической моделью оптического пробоя [108], что позволило создать наиболее полную аналитическую систему расчета профиля давления первичной плазмы. Полученная модель показала хорошее соответствие экспериментальным резуль-

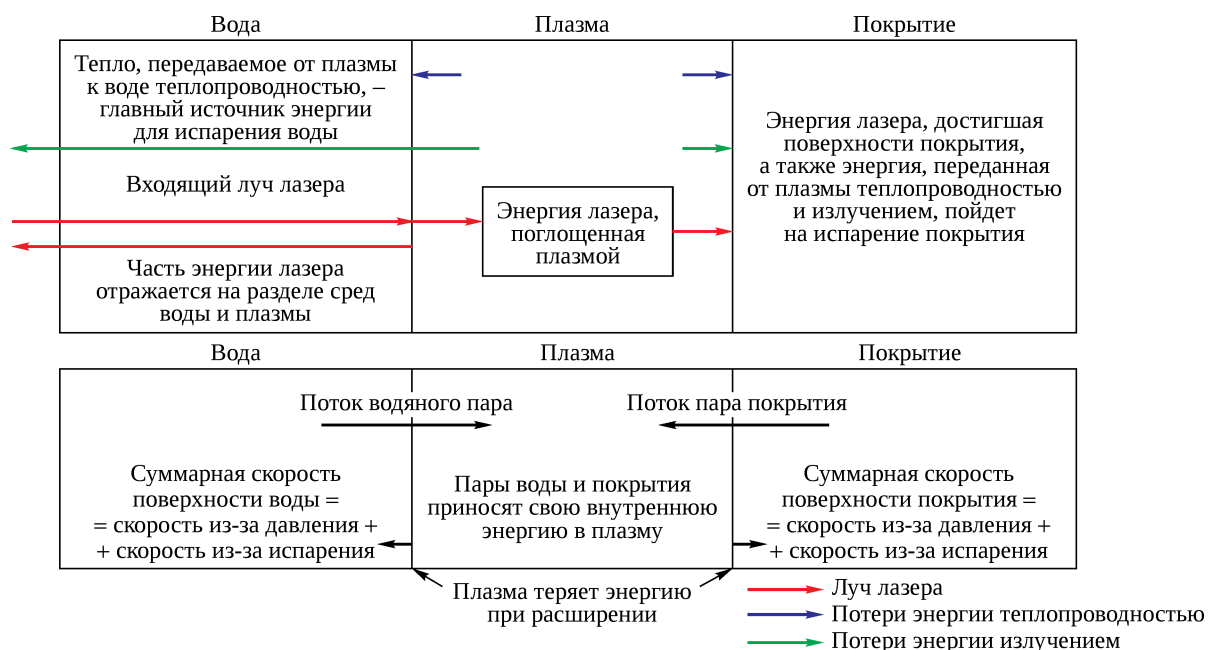


Рис. 19. Главные потоки энергии (сверху) и массы (снизу) в процессе ЛУО, принятые во внимание в работе [106]

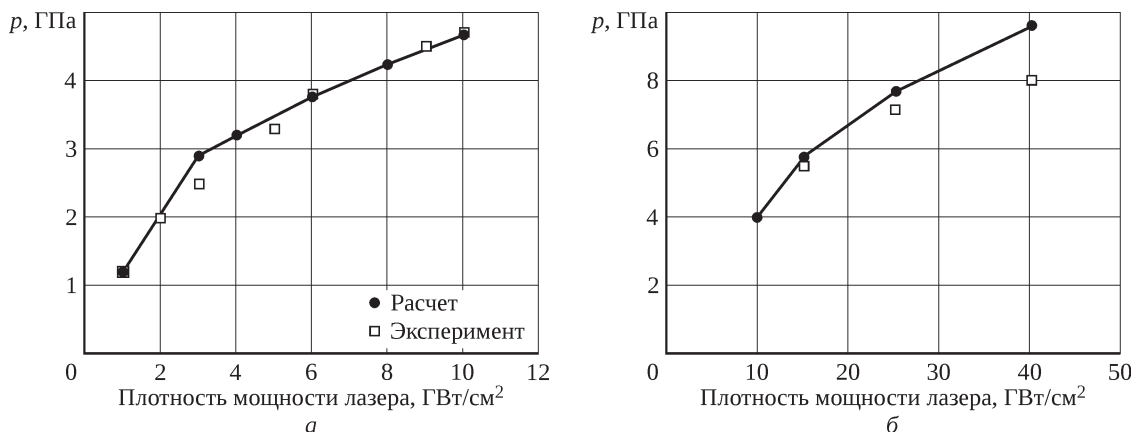


Рис. 20. Валидация модели [106] при малой (а) [87] и большой (б) [119] плотности мощности луча

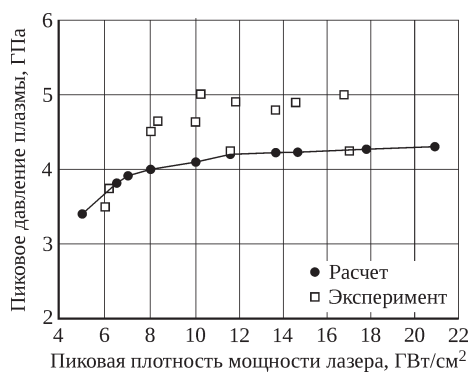


Рис. 21. Валидация модели [106], дополненной моделью [108], по экспериментальным результатам [109] татам, взятым из [109], при больших значениях плотности мощности лазера (рис. 21).

Для задач следующего уровня необходимо знать не только временное, но и пространственное распределение давления плазмы. Обычно принимают, что оно следует распределению Гаусса по радиусу вслед за распределением мощности лазера [49; 101; 117; 120; 121].

Как было отмечено выше, пластическое деформирование цели сказывается на расчетном пиковом давлении плазмы. Кроме того, все описанные модели являются одномерными. Чтобы учесть трехмерный характер процессов и пластическое деформирование материалов, авторы работы [101] создали новую модель, которая представляет собой связку аналитических моделей и конечно-элементной модели с использованием явного метода интегрирования по времени (модели на основе явного метода интегрирования описаны в следующем параграфе).

Конечно-элементные модели с использованием явных методов интегрирования нестационарных уравнений. Когда известно распределение давления во времени и в пространстве, необходимо решить задачу о прохождении ударной волны в металле и о порождаемых этой ударной волной пластических деформациях. Единственный способ решения этой задачи – методы явного интегрирования по времени [122; 123]. Эти методы дают широкий простор для исследований. Так, например, посредством явного интегрирования исследуют пространственное распределение остаточных напряжений от одиночного импульса [49; 124; 125], влияние кривизны геометрии на остаточные напряжения [126; 127], взаимодействие полей напряжений и деформаций от двух и более импульсов [59; 125; 128; 129] и решают другие задачи, где требуется получить точное поле остаточных напряжений с учетом всех краевых эффектов [35; 130].

Сама по себе конечно-элементная модель и прикладываемые к ней граничные условия строятся по известным принципам. Реализация явного алгоритма в пакетах конечно-элементного анализа описана, например, в [122]. Сложность моделирования процесса ЛУО с ис-

пользованием явных методов интегрирования заключается в подборе подходящей модели материала. Скорость деформирования в процессе ЛУО может составлять 10^6 с^{-1} [60], и модель материала должна показывать достоверные результаты в этих условиях. Для реализации явного алгоритма модель материала должна содержать, во-первых, уравнение состояния, которое связывает изменение объема с изменением компонент шарового тензора напряженного состояния, во-вторых, критерий пластичности материала (Мизеса, Треска и т.д.) и, в-третьих, модель упрочнения (изотропное, кинематическое и т.д.). В рамках моделирования ЛУО, как правило, не учитывают влияние нагрева на свойства материала ввиду очень малой продолжительности теплообмена между плазмой и металлом [16].

Иногда применяют упрощенную, не учитывающую скорость деформирования модель идеального упруго-пластического материала, в которой начало пластичности определяется только константой HEL , используется критерий пластичности Мизеса, а уравнение состояния линейно связывает компоненты шарового тензора напряженного состояния с изменением объема [131].

Более распространенной моделью упрочнения является модель Джонсона – Кука [132], которая учитывает скорость деформирования [59; 128; 133; 134]. Было показано, что такая модель лучше других подходит для моделирования процесса ЛУО [135]. К сожалению, в литературе редко встречаются сведения об используемых уравнениях состояния, законах упрочнения и критериях пластичности, хотя различные параметры модели материала могут серьезно влиять на получаемые результаты. Более того, константы материалов, используемые для расчетов, получают при скоростях деформирования намного меньших, чем реализуются при ЛУО. По этой причине авторы работы [134] предложили способ поиска свойств материала через сопоставление конечно-элементного анализа с результатами эксперимента. Таким образом, модель материала при конечно-элементном моделировании является серьезной проблемой. Часто использование динамических расчетов ограничено именно наличием достоверных сведений о поведении материала при высоких скоростях деформирования [131].

Для корректного расчета ЛУО геометрии, содержащей близко расположенные границы, необходимо задавать коэффициенты демпфирования в материале и при отражении ударной волны от границ [60].

Еще одна проблема явного интегрирования заключается в том, что решение может занимать очень много времени, особенно при небольших значениях коэффициентов демпфирования. Чтобы обойти эту проблему, многие авторы используют связку анализа на основе явного интегрирования с анализом на основе неявного

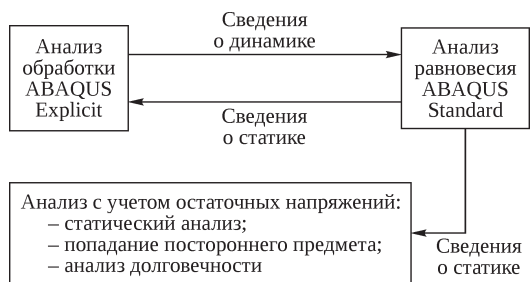


Рис. 22. Связка явного (ABAQUS Explicit) и неявного (ABAQUS Standard) решателей для ускорения процесса решения [131]

интегрирования [19; 60; 131; 136] (рис. 22), которую впервые предложили авторы работы [18]. Анализ на основе неявного интегрирования отличается от статического только тем, что в процессе решения выполняется интегрирование по времени, а вектор нагрузок дополняется силами инерции [123].

При использовании такого связанного анализа явный расчет ведется до тех пор, пока не закончится процесс пластического деформирования. Металл может пластически деформироваться как под действием основной ударной волны, так и под действием отраженных волн. Это стоит учитывать при выборе момента

прерывания явного анализа. После установления всех пластических деформаций файл рестарта, содержащий перемещения, силы, скорости, напряжения и т.д., передается в неявный решатель, где в один шаг нагружения вычисляется равновесное состояние детали (после затухания всех ударных волн) [131].

В работах [137; 138] приведен модифицированный способ моделирования процесса ЛУО на основе явного интегрирования. Авторы предлагают не использовать анализ на основе неявного интегрирования. При этом нагружение производится не непрерывной во времени кривой, а отдельными волнами, в промежутке времени между которыми кинетическая энергия системы угасает ввиду наличия демпфирования в материале (рис. 23). Авторы утверждают, что такой подход позволяет существенно (примерно в три раза) сократить время расчета в сравнении со ставшей стандартом связкой явного и неявного анализов.

Учет микроструктуры в процессе моделирования ЛУО и моделирование изменения микроструктуры.

Авторы работы [139] показали, как учет микроструктуры может влиять на поле остаточных напряжений, получаемых в результате ЛУО. Моделируемый образец был представлен в виде совокупности объемов

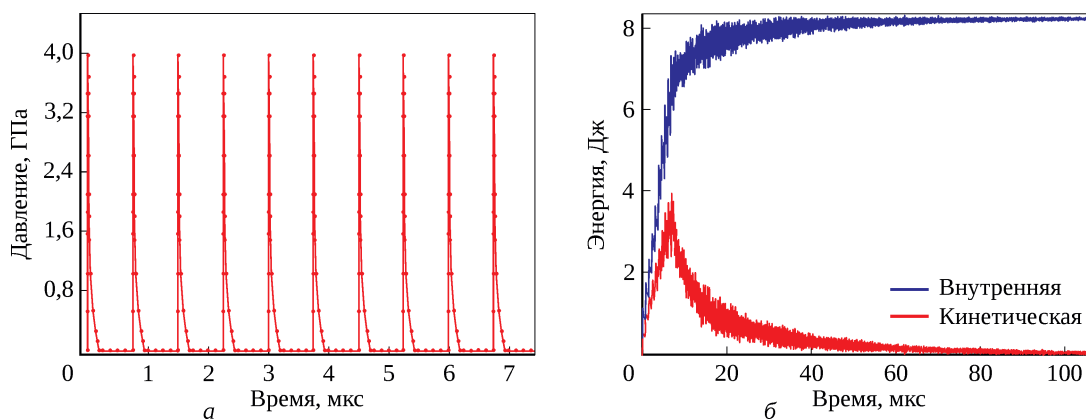


Рис. 23. Примененный в [137] профиль прикладываемого к модели давления (а) и поведение энергий системы при таком нагружении (б)

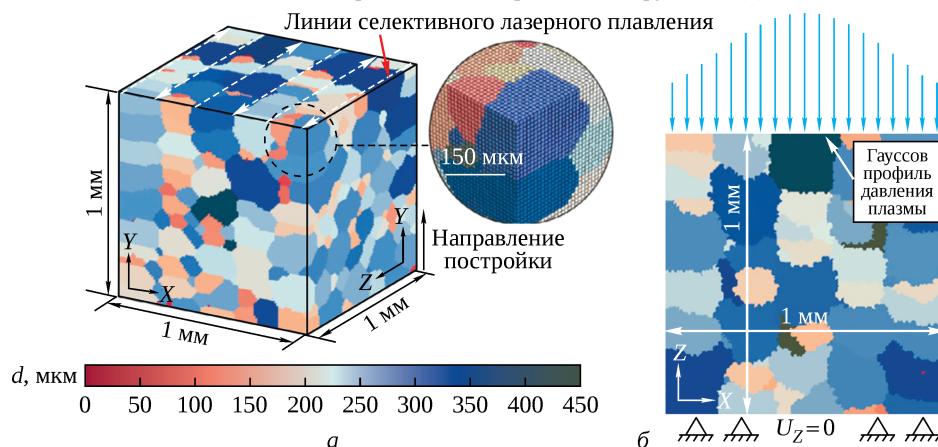


Рис. 24. Конечно-элементная модель образца с учетом микроструктуры (а) и граничные условия (б) [139]

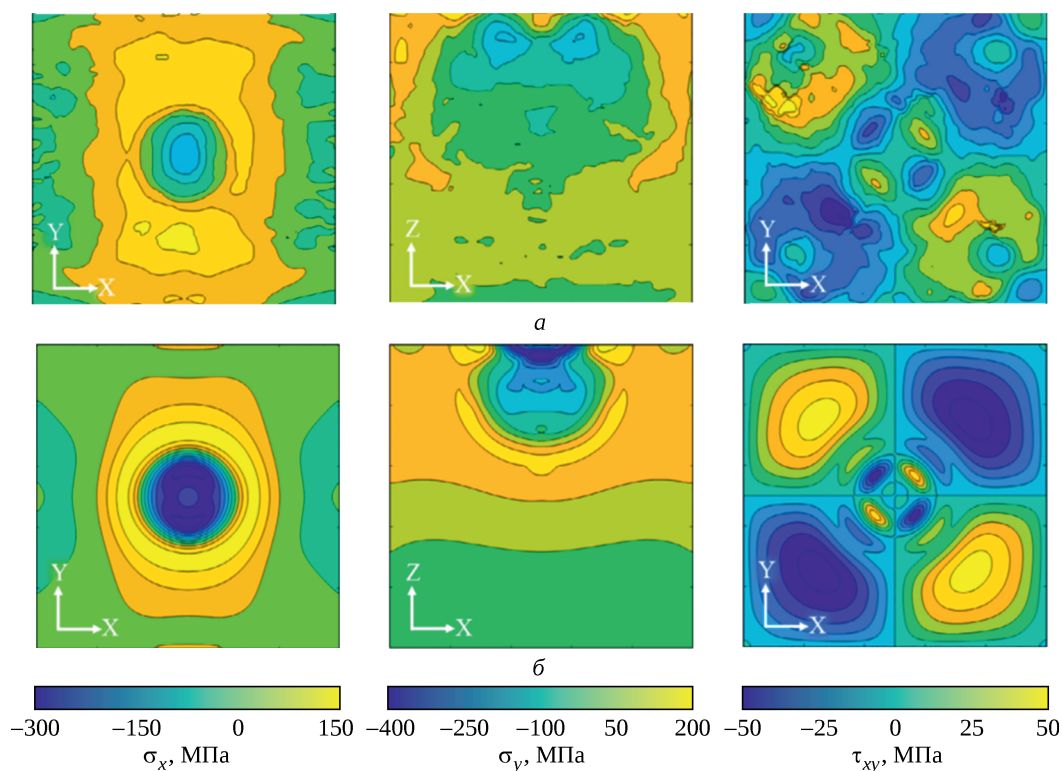


Рис. 25. Поля остаточных напряжений с учетом (а) и без учета (б) микроструктуры [139]

с немного различными, анизотропными свойствами (рис. 24).

В работе [139] показано, что неучет микроструктуры приводит к увеличению прогнозируемых значений остаточных напряжений (рис. 25). Стоит отметить, что такое сильное влияние микроструктуры на остаточные напряжения, возможно, связано с тем, что рассмотренный образец имеет маленький размер, сопоставимый с размером зерна.

Как было отмечено выше, при ЛУО изменяется структура обрабатываемого металла. В нем возрастает плотность дефектов кристаллических решеток и уменьшается средний размер зерна. Существуют расчетные модели для определения микроструктуры, получаемой при обработке. Большинство из них основаны на понятии плотности дислокаций [26; 140]. Уравнения, описывающие движение дислокаций, при применении этих моделей на практике включаются в конечно-элементную динамическую модель так, как это сделано, например, в [141].

Модели на основе собственных деформаций [60; 70; 113; 136; 142–144] не являются в чистом виде математическими моделями процесса ЛУО. Они, скорее, представляют собой упрощенный инженерный подход к проблеме прогнозирования остаточных напряжений, получаемых при ЛУО [113] или других технологических операциях (например, при сварке). Этот способ моделирования был рассмотрен в работе [145] с опорой на простую аналитическую модель. Позднее была показана возмож-

ность использования техники собственных деформаций совместно с методом конечных элементов для моделирования полей остаточных напряжений в реальных деталях [142].

Подробно применение техники к ЛУО описано, например, в [113]. Техника собственных деформаций строится на заключении о том, что результирующее остаточное напряжение складывается из собственного напряжения обработки и уравнивающего напряжения. Уравнивающее напряжение обусловлено конфигурацией обрабатываемой детали, в то время как собственное – режимом обработки и материалом детали. Если образец имеет форму параллелепипеда, одна из граней которого равномерно обработана ППД, уравнивающее напряжение (от макроскопического изгиба, вызванного расширением обработанной поверхности) распределено по толщине образца линейно (см. рис. 14).

Суть техники собственных деформаций заключается в том, что сначала в ходе эксперимента на специальных образцах измеряются остаточные напряжения для конкретного материала детали и режима обработки. После этого вычисляются собственные деформации, соответствующие данным остаточным напряжениям. Затем на этапе прогнозирования остаточных напряжений собственные деформации прикладываются к конечно-элементной модели реальной детали посредством теплового расширения (неравномерного поля температур или неравномерного распределения коэффициентов линейного температурного расширения) и проводится стати-

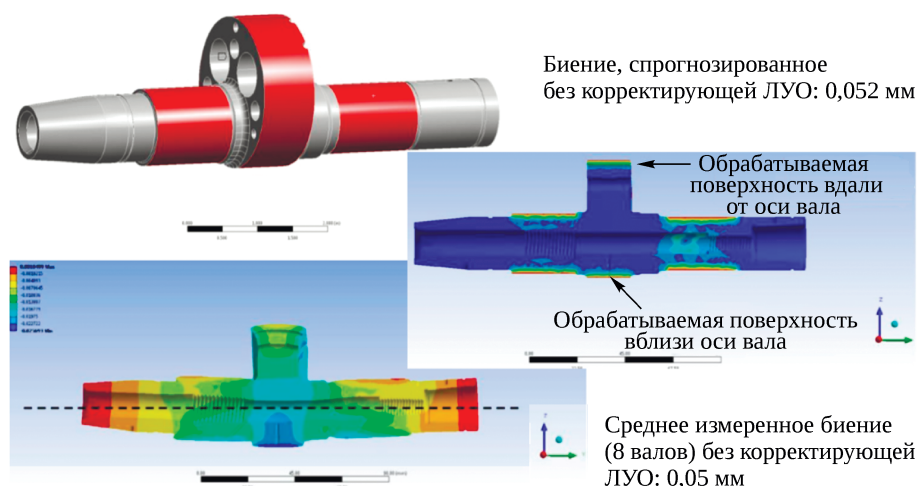


Рис. 26. Оценка коробления вала после ЛУО с помощью техники собственных деформаций [114]

ческий конечно-элементный расчет. После этого становится возможным не только оценивать поля остаточных напряжений, но и изучать коробление детали под действием ЛУО (рис. 26).

Некоторые авторы предлагают совмещать технику собственных деформаций с другими моделями, описанными выше [144]. Они предполагают получать собственные деформации путем конечно-элементного анализа с явным интегрированием по времени, в котором в качестве граничного условия к образцу прикладывается давление, рассчитанное по одной из описанных одномерных моделей.

Техника собственных деформаций сегодня является единственно возможной для применения на практике с целью прогнозирования остаточных напряжений в целой детали. При этом подход имеет ряд серьезных недостатков, главный из которых заключается в том, что при любом, даже незначительном, изменении технологического процесса (параметров покрывных слоев, режима лазера, шага точек и т.д.) необходимо проведение новых экспериментов (и/или расчетов) по определению собственных деформаций. Техника позволяет спрогнозировать результат заданного воздействия, но не дает определить параметры технологического процесса для получения заданного результата, что накладывает серьезные ограничения на ее использование при разработке технологического процесса – возможно определять только обрабатываемую зону. Вторым недостатком техники заключается в том, что она не учитывает отражение и взаимодействие ударных волн [144], из-за чего для использования ее на тонких листах (например, кромках лопаток) необходимо либо создавать отдельные наборы данных для каждой толщины кромки, либо прибегать к динамическому моделированию.

Разработка и оптимизация технологического процесса ЛУО

Для оптимального выбора параметров технологического процесса ЛУО необходимо создание математической модели, которая включала бы в себя взаимосвязь параметров и результатов обработки в явном (функциональном) виде для дальнейшего анализа этой взаимосвязи (поиска максимумов, минимумов, асимптот и т.д.). Сложность заключается в том, что параметров обработки очень много, а связь между ними нелинейна, поэтому на практике нужно использовать аппроксимации для оценки отклика системы на изменение параметров и оптимизационные алгоритмы для поиска сочетаний параметров, обеспечивающих нужный результат.

Авторы [125] провели расчет влияния некоторых параметров обработки (форма луча (A), пиковое давление плазмы (B), диаметр луча (C) и время импульса (D)) на величину и глубину залегания остаточных напряжений, а также на неравномерность поля остаточных напряжений. Модель не учитывала термодинамические эффекты – использовалась конечно-элементная модель с явным интегрированием по времени. Материал цели не варьировался (использовалась сталь 35CD4), защитное покрытие не учитывалось. На основании 16 расчетов (использовалось ортогональное планирование эксперимента) авторы сделали несколько выводов. В частности, они заключили, что увеличение времени импульса всегда ведет к увеличению глубины и величины остаточных напряжений, а пиковое давление имеет оптимум по этим параметрам, причем величина этого оптимума совпадает со значением 2,0...2,5 HEL, считающимся оптимальным в работе [146] (рис. 27).

В работе [111] использован похожий подход, но влияние параметров оценивалось по результатам испы-

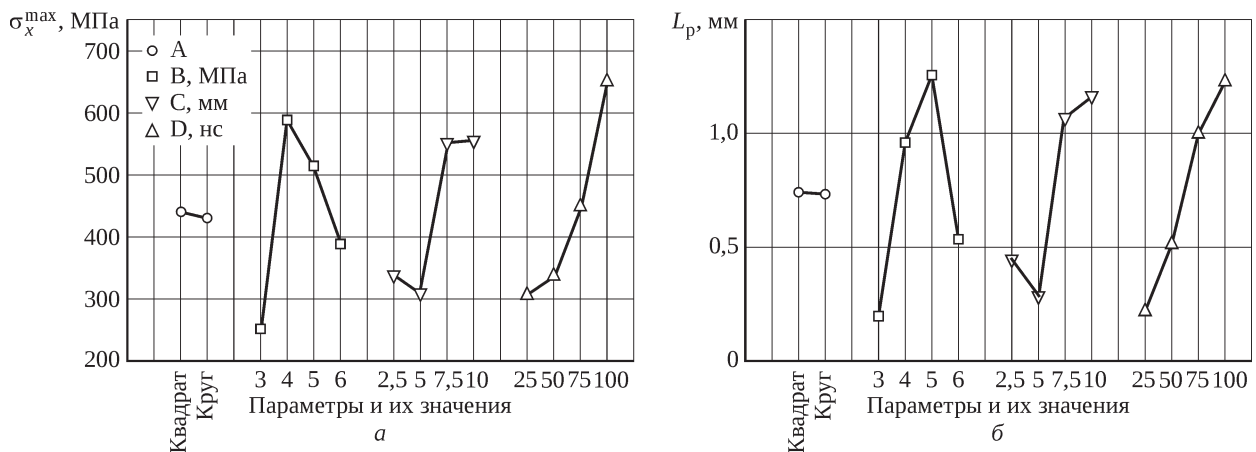


Рис. 27. Результаты расчетов [125]:

а – влияние параметров на максимальное остаточное напряжение;
 б – влияние параметров на глубину залегания остаточных напряжений

таний. Как и в предыдущем случае, во внимание принимались четыре входных параметра, однако сами параметры были другими: толщина образца, плотность мощности лазера, продолжительность импульса, число импульсов на каждой точке. Выходными параметрами считались параметры поля остаточных напряжений. В качестве прозрачного слоя везде использовалась вода, а в качестве поглощающего – алюминиевая фольга. В работе применялось полное двухуровневое планирование эксперимента, при котором для каждого параметра задаются два значения, и проводились испытания при каждом сочетании параметров. В результате были получены матрицы коэффициентов влияния, как это было бы в случае линеаризированной модели. При этом диапа-

зоны входных параметров были достаточно широкими. Таким образом, модель [111] не позволяет оценить экстремумы получаемых функций отклика.

В работе [133] предпринята попытка применения нейросетей для определения взаимного влияния параметров, однако количество входных параметров там еще меньше, чем в работе [125], притом что фактическое отличие заключается только в использовании нейросети вместо планирования эксперимента. Машинное обучение также применялось в работе [141]. Нейросеть обучали на результатах динамических расчетов. Отличительная особенность работы [141] в том, что в числе выходных параметров модели присутствуют параметры микроструктуры (размер зерна и плотность дислокаций).

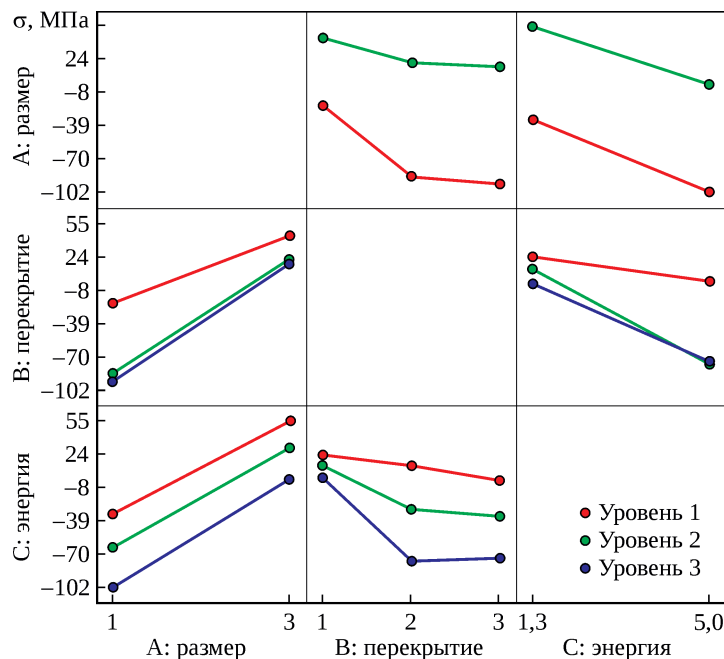


Рис. 28. Влияние взаимодействия параметров на остаточные напряжения на глубине 0,01 мм: размера луча квадратного сечения (А, мм), перекрытия точек (В, импульсов на точку) и энергии импульса (С, Дж) [147]

В работе [147] приведен анализ влияния параметров обработки на поле остаточных напряжений и на сопротивление МнЦУ. Анализ проводился на основе результатов испытаний. Использовалось случайное планирование эксперимента. Авторы получили поверхности отклика и установили влияние взаимодействия параметров на результат (рис. 28).

Как и во всех предыдущих случаях, свойства поглощающего и прозрачного слоев, материала цели и другие параметры системы не варьировались.

Сегодня оптимизационная задача при промышленном применении ЛУО, как правило, не решается – режим обработки выбирается на основе опыта фирмы, после чего решается прямая задача о влиянии обработки с этими параметрами на интересующие свойства детали.

Заключение

Тема лазерной ударной обработки изучается давно. Известно, что ЛУО может улучшить многие свойства обрабатываемых деталей. Этот способ обработки имеет ряд существенных преимуществ перед более традиционными способами поверхностного упрочнения. Все преимущества ЛУО могут быть использованы в авиационной промышленности, в первую очередь там, где

сейчас используется дробеструйная обработка. Существует также ряд перспективных областей применения ЛУО, например ремонт посредством лазерной наплавки с последующей ЛУО или применение ЛУО совместно с 3D-печатью.

Лазерная ударная обработка – сложный процесс, и ее внедрение в промышленности невозможно без понимания большого комплекса вопросов.

Наиболее полное использование одного из главных преимуществ ЛУО – стабильности свойств обработанных поверхностей – предполагает прогнозирование результата обработки, невозможное без достаточно точной математической модели процесса. Такие модели разрабатывались с 1970-х годов. Сегодня есть несколько одномерных моделей, описывающих поведение плазмы. Поведение металла под действием импульса описывают с помощью конечно-элементных расчетов. На практике для прогнозирования полей остаточных напряжений применяют технику собственных деформаций, которая проста в применении, но в крайней степени неуниверсальна – любое изменение технологического процесса требует новой серии экспериментов. Ни одна существующая сегодня математическая модель не позволяет перейти от требуемого результата к технологии. Разработка и оптимизация технологического процесса лазерной ударной обработки – актуальная проблема.

Литература / References

1. Gujba A.K., Medraj M. Laser peening process and its impact on materials properties in comparison with shot peening and ultrasonic impact peening // *Materials*. 2014. Vol. 7, iss. 12. P. 7925–7974.
2. Clauer A.H., Holbrook J.H., Fairand B.P. Effects of laser induced shock waves on metals // *Shock waves and high-strain-rate phenomena in metals : Concepts and applications* / ed. by M.A. Meyers, L.E. Murr. New York and London : Plenum Press, 1981. Chap. 38. P. 675–702.
3. Zhang Y., Lu J., Luo K. Laser shock processing of FCC metals : Mechanical properties and micro-structural strengthening mechanism. Springer, 2013. xi, 194 p. (Springer Series in Materials Science ; vol. 179).
4. Ren X. Laser shocking nano-crystallization and high-temperature modification technology. Springer, 2015. xiii, 131 p.
5. Laser shock peening and its applications: a review / Sundar R., Ganesh P., Ram Kishor Gupta et al. // *Lasers in Manufacturing and Materials Processing*. 2019. Vol. 6, iss. 4. P. 424–463.
6. Laser shock peening and its effects on microstructure and properties of additively manufactured metal alloys: a review / M. Munther, T. Martin, A. Tajyar et al. // *Engineering Research Express*. 2020. Vol. 2, iss. 2. Art. 022001. 11 p.
7. Zhang Ch., Dong Y., Ye Ch. Recent developments and novel applications of laser shock peening: a review // *Advanced Engineering Materials*. 2021. Vol. 23, iss. 7. Art. 2001216.
8. Clauer A.H., Lahrman D.F. Laser shock peening for fatigue resistance // *ASME 2000 International Mechanical Engineering Congress and Exposition : November 5–10, 2000, Orlando, Florida, USA : book of abstracts. (Proceedings of the ASME Materials Division ; vol. 94)*. P. 75. IMECE2000-2681.
9. Chahardehi A., Brennan F.P., Steuwer A. The effect of residual stresses arising from laser shock peening on fatigue crack growth // *Engineering Fracture Mechanics*. 2010. Vol. 77, iss. 11. P. 2033–2039.
10. Surface integrity and fatigue lives of Ti17 compressor blades subjected to laser shock peening with square spots / Sh. Zou, J. Wu, Y. Zhang, Sh. Gong, G. Sun et al. // *Surface and Coatings Technology*. 2018. Vol. 347. P. 398–406.
11. The effect of laser shock peening with and without protective coating on intergranular corrosion of sensitized AA5083 / J. Kaufman, J. Racek, M. Cieslar, P. Minárik, M.A. Steiner, S.R. Mannava, V.K. Vasudevan, A. Sharma, M. Böhm, J. Brajer, J. Pilař, L. Pína, T. Mocek // *Corrosion Science*. 2022. Vol. 194. Art. 109925. 13 p.

-
12. Liu K.K., Hill M.R. The effects of laser peening and shot peening on fretting fatigue in Ti-6Al-4V coupons // *Tribology International*. 2009. Vol. 42, iss. 9. P. 1250–1262.
 13. Аскар'ян Г.А., Морозов Е.М. Давление при испарении вещества в луче радиации // *Журнал экспериментальной и теоретической физики*. 1962. Т. 43, вып. 6. С. 2319–2320.
Askar'yan G.A., Moroz E.M. Pressure on evaporation of matter in a radiation beam. *Soviet Physics – JETP*. 1963. Vol. 16. P. 1638–1639.
 14. Anderholm N.C. Laser-generated stress waves // *Applied Physics Letters*. 1970. Vol. 16, iss. 3. P. 113–115.
 15. Yang L.C. Stress waves generated in thin metallic films by a Q-switched ruby laser // *Journal of Applied Physics*. 1974. Vol. 45, iss. 6. P. 2601–2608.
 16. Fairand B.P., Clauer A.H. Laser generation of high-amplitude stress waves in materials // *Journal of Applied Physics*. 1979. Vol. 50, iss. 3. P. 1497–1502.
 17. Residual stresses induced by laser-shocks / P. Ballard, J. Fournier, R. Fabbro, J. Frelat // *Le Journal de Physique IV*. 1991. Vol. 1, no C3. P. C3-487–C3-494.
 18. Ding K., Ye L. *Laser shock peening : Performance and process simulation*. Boca Raton etc. : CRC Press ; Cambridge : Woodhead Publishing Limited, 2008. viii, 162 p.
 19. Ding K. Three-dimensional dynamic finite element analysis of multiple laser shock peening processes // *Surface Engineering*. 2003. Vol. 19, iss. 5. P. 351–358.
 20. Gill A.S., Telang A., Vasudevan V.K. Characteristics of surface layers formed on inconel 718 by laser shock peening with and without a protective coating // *Journal of Materials Processing Technology*. 2015. Vol. 225, iss. C. P. 463–472.
 21. Tensile properties, residual stress distribution and grain arrangement as a function of sheet thickness of Mg–Al–Mn alloy subjected to two-sided and simultaneous LSP impacts / K.Y. Luo, B. Liu, L.J. Wu, Z. Yan, J.Z. Lu // *Applied Surface Science*. 2016. Vol. 369. P. 366–376.
 22. Plastic deformation behavior of titanium alloy by warm laser shock peening: microstructure evolution and mechanical properties / X. Pan, W. He, X. Huang, X. Wang et al. // *Surface and Coatings Technology*. 2021. Vol. 405. Art. 126670.
 23. Effect of dynamic recrystallization on texture orientation and grain refinement of Ti6Al4V titanium alloy subjected to laser shock peening / X. Pan, X. Wang, Z. Tian, W. He, X. Shi, P. Chen, L. Zhou // *Journal of Alloys and Compounds*. 2021. Vol. 850. Art. 156672.
 24. Dhakal B., Swaroop S. Mechanical properties and deformation dependent microstructural aspects of laser shock peened 7075-T6 aluminum alloy without coating // *Materials Characterization*. 2022. Vol. 183. Art. 111620.
 25. Trdan U., Skarba M., Grum J. Laser shock peening effect on the dislocation transitions and grain refinement of Al–Mg–Si alloy // *Materials Characterization*. 2014. Vol. 97. P. 57–68.
 26. Dislocation density-based study of grain refinement induced by laser shock peening / Ch. Wang, L. Wang, Ch.-Li Wang, K. Li, X.-G. Wang // *Optics & Laser Technology*. 2020. Vol. 121. Art. 105827.
 27. Self-nanocrystallization of Ti-6Al-4V alloy surface induced by laser shock processing / Che Zhigang, Y. Jie, G. Shuili, C. Ziwen, Z. Shikun, Xu Haiying // *Rare Metal Materials and Engineering*. 2014. Vol. 43, iss. 5. P. 1056–1060.
 28. Fatigue strength improvement in Ti-6Al-4V subjected to foreign object damage by combined treatment of laser shock peening and shot peening / L. Wang, L. Zhou, L. Liu et al. // *International Journal of Fatigue*. 2022. Vol. 155. Art. 106581.
 29. Depth-profiling of residual stress and microstructure for austenitic stainless steel surface treated by cavitation, shot and laser peening / M. Kumagai, M.E. Curd, H. Soyama, T. Ungár, G. Ribárik, Ph.J. Withers // *Materials Science and Engineering: A*. 2021. Vol. 813. Art. 141037.
 30. Wang B., Cheng Li, Li D. Study on very high cycle fatigue properties of forged TC4 titanium alloy treated by laser shock peening under three-point bending // *International Journal of Fatigue*. 2022. Vol. 156. Art. 106668.
 31. Effect of laser shock peening on combined low- and high-cycle fatigue life of casting and forging turbine blades / C. Chen, X. Zhang, X. Yan et al. // *Journal of Iron and Steel Research International*. 2018. Vol. 25, iss. 1. P. 108–119.
 32. The effects of shot and laser peening on fatigue life and crack growth in 2024 aluminum alloy and 4340 steel / R.A. Everett, R. Prabhakaran, J.C. Newman, M.J. Dubberly ; NASA, Langly Research Center. 2001. 18, [3] p. NASA/TM-2001-210843. ARL-TR-2363.
 33. Investigation on effect of laser shock processing on fatigue crack initiation and its growth in aluminum alloy plate / X.Q. Zhang, H. Li, X.L. Yu, Y. Zhou, S.W. Duan, S.Z. Li, Z.L. Huang, L.S. Zuo // *Materials & Design (1980–2015)*. 2015. Vol. 65. P. 425–431.
 34. Experimental study and fatigue life prediction on high cycle fatigue performance of laser-peened TC4 titanium alloy / X. Nie, W. He, Z. Cao, J. Song, X. Li, Z. Pang, X. Yan // *Materials Science and Engineering: A*. 2021. Vol. 822. Art. 141658.
-

-
35. Influence of pulse sequence and edge material effect on fatigue life of Al2024-T351 specimens treated by laser shock processing / C. Correa, L. Ruiz de Lara, M. Díaz, J.A. Porro, García- A. Beltrán, J.L. Ocaña // *International Journal of Fatigue*. 2015. Vol. 70. P. 196–204.
 36. Residual stress distribution and elevated temperature fatigue behaviour of laser peened Ti-6Al-4V with a curved surface / K. Praveenkumar, P. Mylavarapu, A. Sarkar, E. Isaac Samuel, A. Nagesha, S. Swaroop // *International Journal of Fatigue*. 2022. Vol. 156. Art. 106641.
 37. Fatigue behavior of double-sided laser shock peened Ti-6Al-4V thin blade subjected to foreign object damage / X. Ren, B. Chen, J. Jiao, Y. Yang, W. Zhou, Z. Tong // *Optics & Laser Technology*. 2020. Vol. 121. Art. 105784.
 38. Effects of laser shock peening on microstructures and properties of 2195 Al-Li alloy / Y. Yang, X. Lian, K. Zhou, G. Li // *Journal of Alloys and Compounds*. 2019. Vol. 781. P. 330–336.
 39. Sathyajith S., Kalainathan S. Effect of laser shot peening on precipitation hardened aluminum alloy 6061-T6 using low energy laser // *Optics and Lasers in Engineering*. 2012. Vol. 50, iss. 3. P. 345–348.
 40. Mitigation of stress corrosion cracking susceptibility of machined 304L stainless steel through laser peening / R. Sundar, P. Ganesh, B. Sunil Kumar, R.K. Gupta, D.C. Nagpure, R. Kaul, K. Ranganathan, K.S. Bindra, V. Kain, S.M. Oak & Bijendra Singh // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2016. Vol. 25, iss. 9. P. 3710–3724.
 41. Experimental-numerical study of laser-shock-peening-induced retardation of fatigue crack propagation in Ti-17 titanium alloy / R. Sun, S. Keller, Y. Zhu et al. / *International Journal of Fatigue*. 2021. Vol. 145. Art. 106081.
 42. Luo X., Dang N., Wang X. The effect of laser shock peening, shot peening and their combination on the microstructure and fatigue properties of Ti-6Al-4V titanium alloy // *International Journal of Fatigue*. 2021. Vol. 153. Art. 106465.
 43. Laser shock peening induced fatigue crack retardation in Ti-17 titanium alloy / R. Sun, L. Li, W. Guo, P. Peng, T. Zhai, Z. Che, B. Li, C. Guo, Y. Zhu // *Materials Science and Engineering: A*. 2018. Vol. 737. P. 94–104.
 44. Spanrad S., Tong J. Characterisation of foreign object damage (FOD) and early fatigue crack growth in laser shock peened Ti-6Al-4V aerofoil specimens // *Materials Science and Engineering: A*. 2011. Vol. 528, iss. 4/5. P. 2128–2136.
 45. Fatigue crack growth in laser-shock-peened Ti-6Al-4V aerofoil specimens due to foreign object damage / B. Lin, C. Lupton, S. Spanrad, J. Schofield, J. Tong // *International Journal of Fatigue*. 2014. Vol. 59. P. 23–33.
 46. Fatigue crack growth in residual stress fields of laser shock peened Ti6Al4V titanium alloy / Hepeng Zhang, Z. Cai, J. Chi, R. Sun, Z. Che, Hongqiang Zhang, W. Guo // *Journal of Alloys and Compounds*. 2021. Vol. 887. Art. 161427.
 47. Effects of fatigue and fretting on residual stresses introduced by laser shock peening / A. King, A. Steuwer, C. Woodward, P.J. Withers // *Materials Science and Engineering: A*. 2006. Vol. 435/436. P. 12–18.
 48. Effects of square spot size and beam quality on residual stress of 7050 aluminum alloy by laser shock peening / B. Sun, J. Zhao, H. Qiao, Y. Lu // *Materials Chemistry and Physics*. 2022. Vol. 284. Art. 126023.
 49. Investigation on the non-homogeneity of residual stress field induced by laser shock peening / Y. Hu, C. Gong, Z. Yao, J. Hu // *Surface and Coatings Technology*. 2009. Vol. 203, iss. 23. P. 3503–3508.
 50. Fatigue behaviour of PBF additive manufactured Ti6Al4V alloy after shot and laser peening / S. Aguado-Montero, C. Navarro, J. Vázquez, F. Lasagni, S. Slawik, J. Domínguez // *International Journal of Fatigue*. 2022. Vol. 154. Art. 106536.
 51. 3D laser shock peening – a new method for improving fatigue properties of selective laser melted parts / N. Kalentics, M.O.V. de Seijas, S. Griffiths, C. Leinenbach, R.E. Logé // *Additive Manufacturing*. 2020. Vol. 33. Art. 101112.
 52. Effect of laser shock peening on microstructure and mechanical properties of TiC strengthened inconel 625 alloy processed by selective laser melting / L. Chen, P. Gu, T. Ge, Y. Sun, L. Li, X. Ren // *Materials Science and Engineering: A*. 2022. Vol. 835. Art. 142610.
 53. Water temperature as acoustic impedance control for efficient laser peening / N.S. Masroon, A. Hata, M. Tsuyama, M. Heya, H. Nakano // *Optik*. 2021. Vol. 242. Art. 167097.
 54. Effect of controlled shot peening and laser shock peening on the fatigue performance of 2024-T351 aluminum alloy / C.A. Rodopoulos, J.S. Romero, S.A. Curtis, E.R. de los Rios, D.P. Peyre // *Journal of Materials Engineering and Performance*. 2003. Vol. 12, iss. 4. P. 414–419.
 55. Effects of laser shock processing and shot peening on 253 MA austenitic stainless steel and their consequences on fatigue properties / L. Spadaro, S. Hereñú, R. Strubbia, G. Gómez Rosas, R. Bolmaro, C. Rubio González // *Optics & Laser Technology*. 2020. Vol. 122. Art. 105892.
 56. Experimental study of laser-driven shock waves in stainless steels / P. Peyre, L. Berthe, X. Scherpereel, R. Fabbro, E. Bartnicki // *Journal of Applied Physics*. 1998. Vol. 84, iss. 11. P. 5985–5992.
 57. Research on surface integrity of Ti-6Al-4V alloy with compound treatment of laser shock peening and shot peening / L. Zhou, X. Pan, X. Shi, T. Du, L. Wang, S. Luo, W. He, P. Chen // *Vacuum*. 2022. Vol. 196. Art. 110717.
-

-
58. Разработка и применение новых методов упрочнения деталей ГТД, основанных на пластическом деформировании поверхностных слоев (обзор) / Ю.А. Ножницкий, А.В. Фишгойт, Р.И. Ткаченко, С.В. Теплова // Вестник двигателестроения. 2006. № 2. С. 8–16.
Nozhnitskii Yu.A., Fishgoit A.V., Tkachenko R.I., Teplova S.V. Razrabotka i primeneniye novykh metodov uprochneniia detalei GTD, osnovannykh na plasticheskom deformirovaniy poverkhnostnykh sloev (obzor) [Development and application of new methods of hardening GTE components based on plastic deformation of surface layers (review)]. Vestnik dvigatelestroeniia [Journal of Engine Development]. 2006. No 2. P. 8–16.
 59. Prediction and characterization of residual stresses from laser shock peening / R.A. Brockman, W.R. Braisted, S.E. Olson et al. // International Journal of Fatigue. 2012. Vol. 36, iss. 1. P. 96–108.
 60. Achintha M., Nowell D. Eigenstrain modelling of residual stresses generated by laser shock peening // Journal of Materials Processing Technology. 2011. Vol. 211, iss. 6. P. 1091–1101.
 61. Laser peening of dovetail slots by fiber optical and articulate arm beam delivery : patent US 7321105 / A.H. Clauer et al. ; assignee LSP Technologies. Appl. No. 10/784,725, filed 20.02.2004 ; publ. date 22.01.2008.
 62. Dislocation-based study on the influences of shot peening on fatigue resistance / C. Wang, Y. Lai, L. Wang, C. Wang // Surface and Coatings Technology. 2020. Vol. 383. Art. 125247.
 63. Nicholas T. High cycle fatigue : A mechanics of materials perspective. Elsevier Science, 2006. 656 p.
 64. Uihlein T., Schlegel H. Titanium fire in jet engines // Proceedings AGARD-CP-587 of the AGARD conference “Aircraft Fire Safety”, 14–17 October 1996. P. 25-1–25-12. URL: <https://www.fire.tc.faa.gov/pdf/fsr-0457.pdf> (дата обращения: 23.04.2022).
 65. Prediction of high-cycle fatigue strength in a Ti-17 alloy blade after foreign object damage / Zh. Zhao, L. Wang, J. Zhang, L. Liu, W. Chen // Engineering Fracture Mechanics. 2021. Vol. 241. Art. 107385.
 66. Nozhnitsky Yu.A. The problem of ensuring strength reliability of gas turbine engines // IOP Conference Series: Materials Science and Engineering. 2017. Vol. 302. Art. 012082. 9 p. DOI 10.1088/1757-899X/302/1/012082.
 67. Bartsch T.M. High Cycle Fatigue (HCF) Science and Technology Program : 2001 annual report: May 2002 : final report for 1 January 2001 – 31 December 2001 / Air Force Research Laboratory. xiv, 216 p. AFRL-PR-WP-TR-2002-2060.
 68. LaserPeen processing / LSP Technologies, Inc. 2003. 2 p. URL: <https://www.lsptechnologies.com/wp-content/uploads/2008/05/laser-shock-peening-brochure-rev-9-04-03.pdf> (дата обращения: 23.04.2022).
 69. Medve R. Onboard ship integration of laser peening system for lasting aluminum repairs. 2021. 21 p. (NSRP Planning, Production Processes and Facilities Panel Meeting, March 24th, 2021). URL: <https://docplayer.net/205829986-Onboard-ship-integration-of-laser-peening-system-for-lasting-aluminum-repairs.html> (дата обращения: 07.04.2022).
 70. Eigenstrain simulation of residual stresses induced by laser shock processing in a Ti6Al4V hip replacement / C. Correa, A. Gil-Santos, J.A. Porro, M. Díaz, J.L. Ocaña // Materials & Design. 2015. Vol. 79. P. 106–114.
 71. Ravinder C. A review of research on aeronautical fatigue in the United States : for presentation at the Meeting of the International Committee on Aeronautical Fatigue and Structural Integrity. Krakow, Poland, 2019.
 72. Tenaglia R.D., Lahrman D.F. Preventing fatigue failures with laser peening // AMPTIAC Quarterly. 2003. Vol. 7, iss 2. P. 3–7.
 73. The Air Force Manufacturing Technology Laser Peening Initiative / D.W. See, J.L. Dulaney, A.H. Clauer, R.D. Tenaglia // Surface Engineering. 2002. Vol. 18, iss. 1. P. 32–36.
 74. Engine Structural Integrity Program (ENSIP) : Department of Defense handbook / United States Department of Defense. 2002. xii, 159 p. MIL-HDBK-1783B.
 75. Laser peening for U.S. Army helicopters : technology overview / V. Champagne, S. Grendahl, R. Tenaglia, D. Lahrman. 21 p. URL: <https://fliphtml5.com/bumg/fbub/basic> (дата обращения: 07.04.2022).
 76. Laser peening extends the lifetime of Rolls-Royce fan blades // Manchester 1984 : The University of Manchester : site. URL: <https://www.materials.manchester.ac.uk/research/impact/laser-peening/> (дата обращения: 07.04.2022).
 77. Clauer A.H. Laser shock processing: past, present and future. 2013. (4th International Conference on Laser Peening : 6–10 May 2013, Madrid, Spain, Universidad Politécnica de Madrid).
 78. F-22 Programm. Full scale component tests to validate the effects of laser shock peening / Polin L., Bunch J., Caruso P., McClure J. URL: <http://www.meetingdata.utcd Dayton.com/agenda/asip/2011/proceedings/presentations/P5098.pdf> (дата обращения: 01.02.2022).
 79. Thin-sheet-metal bending by laser peen forming with femtosecond laser / Y. Sagisaka, M. Kamiya, M. Matsuda, Y. Ohta // Journal of Materials Processing Technology. 2010. Vol. 210, iss. 15. P. 2304–2309.
 80. High-cycle and very-high-cycle fatigue lifetime prediction of additively manufactured AlSi10Mg via crystal plasticity finite element method / J. Zhang, J. Li, S. Wu et al. // International Journal of Fatigue. 2022. Vol. 155. Art. 106577.
-

-
81. Liao Y., Ye C., Cheng G.J. A review: Warm laser shock peening and related laser processing technique // *Optics & Laser Technology*. 2016. Vol. 78. P. 15–24.
 82. Combining manufacturing of titanium alloy through direct energy deposition and laser shock peening processes / J. Chi, Z. Cai, Hepeng Zhang, Hongqiang Zhang, W. Guo, Z. Wan, G. Han, P. Peng, Z. Zeng // *Materials & Design*. 2021. Vol. 203. Art. 109626.
 83. Portable laser peening system developed for aircraft maintenance // *Laser Systems Europe*. URL: <https://www.laser-systemseurope.com/news/portable-laser-peening-system-developed-aircraft-maintenance> (дата обращения: 07.04.2022). Publ. date: 07.06.2021.
 84. May N. LSP Technologies delivers portable laser peening system to Airbus // *LSP Technologies*. URL: <https://www.lsptechnologies.com/resources/lsp-technologies-delivers-portable-laser-peening-system-to-airbus/> (дата обращения: 29.04.2022). Publ. date: 18.05.2021.
 85. Laser shock surface treatment of Ni-based superalloys / P. Forget, J.L. Strudel, M. Jeandin, J. Lu, L. Castex // *Materials and Manufacturing Processes*. 1990. Vol. 5, iss. 4. P. 501–528.
 86. Mao Bo, Liao Y., Li B. Abnormal twin-twin interaction in an Mg-3Al-1Zn magnesium alloy processed by laser shock peening // *Scripta Materialia*. 2019. Vol. 165. P. 89–93.
 87. Shock waves from a water-confined laser-generated plasma / L. Berthe, R. Fabbro, P. Peyre, L. TOLLIER, E. Bartnicki // *Journal of Applied Physics*. 1997. Vol. 82, iss. 6. P. 2826–2832.
 88. Cryogenic ultrahigh strain rate deformation induced hybrid nanotwinned microstructure for high strength and high ductility / C. Ye, S. Suslov, D. Lin, Y. Liao, G.J. Cheng // *Journal of Applied Physics*. 2014. Vol. 115, iss. 21. Art. 213519.
 89. Masse J.-E., Barreau G. Laser generation of stress waves in metal // *Surface and Coatings Technology*. 1995. Vol. 70, iss. 2/3. P. 231–234.
 90. White R.M. Elastic wave generation by electron bombardment or electromagnetic wave absorption // *Journal of Applied Physics*. 1963. Vol. 34, iss. 7. P. 2123–2124.
 91. Physical study of laser-produced plasma in confined geometry / R. Fabbro, J. Fournier, P. Ballard, D. Devaux, J. Virmont // *Journal of Applied Physics*. 1990. Vol. 68, iss. 2. P. 775–784.
 92. Computational model for a low-temperature laser-plasma driver for shock-processing of metals and comparison to experimental data / J.D. Colvin, E.R. Ault, W.E. King, I.H. Zimmerman // *Physics of Plasmas*. 2003. Vol. 10, iss. 7. P. 2940–2947.
 93. Residual stress improvement in metal surface by underwater laser irradiation / Y. Sano, N. Mukai, K. Okazaki, M. Obata // *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research. Section B: Beam Interactions with Materials and Atoms*. 1997. Vol. 121, iss. 1/4. P. 432–436.
 94. Tailoring residual stress profile of selective laser melted parts by laser shock peening / N. Kalentics, E. Boillat, P. Peyre, S. Ćirić-Kostić, N. Bogojević, R.E. Logé // *Additive Manufacturing*. 2017. Vol. 16. P. 90–97.
 95. The effect of laser shock processing on mechanical properties of an advanced powder material depending on different ablative coatings and confinement medias / Y. Yang, Y. Lu, H. Qiao, J. Zhao, B. Sun, J. Wu, X. Hu // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2021. Vol. 117, iss. 7/8. P. 2377–2385.
 96. Experimental study of ablation pressures and target velocities obtained in 0,26 μm wavelength laser experiments in planar geometry / R. Fabbro, B. Faral, J. Virmont et al. // *Physics of Fluids*. 1985. Vol. 28, iss. 11. P. 3414–3423.
 97. Laser-matter interaction in laser shock processing / A. Sollier, L. Berthe, P. Peyre, E. Bartnicki, R. Fabbro // *LAMP 2002: International Congress on Laser Advanced Materials Processing : 27–31 May 2002, Osaka, Japan* / ed. I. Miyamoto et al. (SPIE Proceedings ; vol. 4831: First International Symposium on High-Power Laser Macroprocessing). P. 463–467.
 98. FEM simulation of residual stresses induced by laser peening / P. Peyre, A. Sollier, I. Chaieb, L. Berthe, E. Bartnicki, C. Braham, R. Fabbro // *The European Physical Journal – Applied Physics*. 2003. Vol. 23, iss. 2. P. 83–88.
 99. Wu B., Tao S., Lei S. Numerical modeling of laser shock peening with femtosecond laser pulses and comparisons to experiments // *Applied Surface Science*. 2010. Vol. 256, iss. 13. P. 4376–4382.
 100. Femtosecond laser ablation of gold in water: influence of the laser-produced plasma on the nanoparticle size distribution / J.-P. Sylvestre, A.V. Kabashin, E. Sacher, M. Meunier // *Applied Physics A*. 2005. Vol. 80, iss. 4. P. 753–758.
 101. A new effective method to estimate the effect of laser shock peening / X. Wu, C. Huang, Xi Wang, H. Song // *International Journal of Impact Engineering*. 2011. Vol. 38, iss. 5. P. 322–329.
 102. Laser ablation of titanium alloy under a thin and flowing water layer / V. Tangwarodomnukun, P. Likhitangsuwat, O. Tevinpibanphan, C. Dumkum // *International Journal of Machine Tools and Manufacture*. 2015. Vol. 89. P. 14–28.
 103. Effect of confinement layer on laser ablation and cavitation bubble during laser shock peening / T. Takata, M. Enoki, P. Chivavibul, A. Matsui, Y. Kobayashi // *Materials Transactions*. 2016. Vol. 57, iss. 10. P. 1776–1783.
-

-
104. Neyer B.T. Velocity interferometer system for any reflector (VISAR) // SPIE Institutes for Advanced Optical Technologies : 22–24 September 1988, Hamburg, Germany. (SPIE Proceedings ; vol. 648: Photonics: High Bandwidth Analog Applications). P. 301.
 105. Langer K., Spradlin T.J., Fitzpatrick M.E. Finite element analysis of laser peening of thin aluminum structures // Metals. 2020. Vol. 10, iss. 1. P. 93.
 106. Wu B., Shin Y.C. A self-closed thermal model for laser shock peening under the water confinement regime configuration and comparisons to experiments // Journal of Applied Physics. 2005. Vol. 97, iss. 11. Art. 113517.
 107. Fabrication and characterization of micro dent array produced by laser shock peening on aluminum surfaces / R. Caslaru, M.P. Sealy, Y.B. Guo, S.C. Chen // 37th Annual North American Manufacturing Research Conference, NAMRC 37 : 19–22 May 2009, Greenville, SC, United States. (Transactions of the North American Manufacturing Research Institution of SME ; vol. 37). P. 159–166.
 108. Wu B., Shin Y.C. Laser pulse transmission through the water breakdown plasma in laser shock peening // Applied Physics Letters. 2006. Vol. 88, iss. 4. Art. 041116.
 109. Wavelength dependent of laser shock-wave generation in the water-confinement regime / L. Berthe, R. Fabbro, P. Peyre, E. Bartnicki // Journal of Applied Physics. 1999. Vol. 85, iss. 11. P. 7552–7555.
 110. Microstructural response and grain refinement mechanism of commercially pure titanium subjected to multiple laser shock peening impacts / J.Z. Lu, L.J. Wu, G.F. Sun, K.Y. Luo, Y.K. Zhang, J. Cai, C.Y. Cui, X.M. Luo // Acta Materialia. 2017. Vol. 127. P. 252–266.
 111. Laser shock peening of Ti-17 titanium alloy: influence of process parameters / C. Cellard, D. Reiraint, M. François, E. Rouhaud, D. Le Saunier // Materials Science and Engineering: A. 2012. Vol. 532. P. 362–372.
 112. Ding K., Ye L. Simulation of multiple laser shock peening of a 35CD4 steel alloy // Journal of Materials Processing Technology. 2006. Vol. 178, iss. 1/3. P. 162–169.
 113. DeWald A.T., Hill M.R. Eigenstrain-based model for prediction of laser peening residual stresses in arbitrary three-dimensional bodies. Part 2: Model verification // The Journal of Strain Analysis for Engineering Design. 2009. Vol. 44, iss. 1. P. 13–27.
 114. Bovid S. Laser peen forming : Webinar: Technology and Applications : 27 June 2019. 23 p. URL: <https://www.lspstechnologies.com/wp-content/uploads/2019/10/laserpeenforming.pdf> (дата обращения: 30.12.2021).
 115. Brar N.S., Hopkins A., Laber M.W. Laser shock peening of titanium 6-4 alloy // Shock Compression of Condensed Matter – 1999 : 27 June – 2 July 1999, Snowbird, Utah (USA). (AIP Conference Proceedings ; vol. 505). P. 435–438.
 116. The effect of laser shock processing on mechanical properties of an advanced powder material depending on different ablative coatings and confinement medias / Y. Yang, Y. Lu, H. Qiao, J. Zhao, B. Sun, J. Wu, X. Hu // The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2021. Vol. 117, iss. 7/8. P. 2377–2385.
 117. Engebretsen C.C., Palazotto A.N., Langer K. Laser shock impulse modelling via data matching. 2019. (AIAA Scitech 2019 Forum : 7–11 January 2019, San Diego, California ; AIAA 2019-0512).
 118. Eymard R., Gallouët T., Herbin R. Finite volume methods // Handbook of numerical analysis. Vol. 7: Solution of equation in \mathbb{R}^n (part 3) ; Techniques of scientific computing (part 3). Elsevier Science, 2000. P. 713–1018.
 119. Experimental determination by PVDF and EMV techniques of shock amplitudes induced by 0,6-3 ns laser pulses in a confined regime with water / P. Peyre, L. Berthe, R. Fabbro, A. Sollier // Journal of Physics D: Applied Physics. 2000. Vol. 33, iss. 5. P. 498–503.
 120. Zhang W., Yao Y.L., Noyan I.C. Microscale laser shock peening of thin films, part 1: Experiment, modeling and simulation // Journal of Manufacturing Science and Engineering. 2004. Vol. 126, iss. 1. P. 10–17.
 121. Zhang W., Yao Y.L. Improvement of laser induced residual stress distributions via shock waves // ICALEO 2000: Proceedings of the Laser Materials Processing Conference : October 2–5, 2000, Dearborn, Michigan, USA. P. E183–E192.
 122. Wu S.R., Gu L. Introduction to the explicit finite element method for nonlinear transient dynamics. John Wiley & Sons, 2012. 352 p.
 123. Sun J.S., Lee K.H., Lee H.P. Comparison of implicit and explicit finite element methods for dynamic problems // Journal of Materials Processing Technology. 2000. Vol. 105, iss. 1/2. P. 110–118.
 124. Peyre P., Chaieb I., Braham C. FEM calculation of residual stresses induced by laser shock processing in stainless steels // Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering. 2007. Vol. 15, iss. 3. P. 205–221.
 125. Study on residual stress of laser shock processing based on numerical simulation and orthogonal experimental design / Y.X. Hu, Z.Q. Yao, F. Wang, J. Hu // Surface Engineering. 2007. Vol. 23, iss. 6. P. 470–478.
 126. Vasu A., Grandhi R.V. Compressive residual stress optimization in laser peening of a curved geometry // 11th International Conference on Shot Peening : September 12–15, 2011, South Bend, Indiana, USA. P. 329–334.
-

-
127. Vasu A., Grandhi R.V. Effects of curved geometry on residual stress in laser peening // *Surface and Coatings Technology*. 2013. Vol. 218. P. 71–79.
 128. Ranjith Kumar G., Rajyalakshmi G. FE simulation for stress distribution and surface deformation in Ti-6Al-4V induced by interaction of multi scale laser shock peening parameters // *Optik*. 2020. Vol. 206. Art. 164280.
 129. Simulation and experimental study on residual stress distribution in titanium alloy treated by laser shock peening with flat-top and Gaussian laser beams / X. Li, W. He, S. Luo et al. // *Materials*. 2019. Vol. 12, iss. 8. Art. 1343. 12 p.
 130. Effect of advancing direction on fatigue life of 316L stainless steel specimens treated by double-sided laser shock peening / C. Correa, L. Ruiz de Lara, M. Díaz, A. Gil-Santos, J.A. Porro, J.L. Ocaña // *International Journal of Fatigue*. 2015. Vol. 79. P. 1–9.
 131. Braisted W. Finite element simulation of laser shock peening // *International Journal of Fatigue*. 1999. Vol. 21, iss. 7. P. 719–724.
 132. Gambirasio L., Rizzi E. On the calibration strategies of the Johnson–Cook strength model: discussion and applications to experimental data // *Materials Science and Engineering: A*. 2014. Vol. 610. P. 370–413.
 133. Ayeb M., Frija M., Fathallah R. Prediction of residual stress profile and optimization of surface conditions induced by laser shock peening process using artificial neural networks // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. Vol. 100, iss. 9/12. P. 2455–2471.
 134. Simulation of residual stress induced by a laser peening process through inverse optimization of material models / H.K. Amarchinta, R.V. Grandhi, A.H. Clauer, K. Langer, D.S. Stargel // *Journal of Materials Processing Technology*. 2010. Vol. 210, iss. 14. P. 1997–2006.
 135. Material model validation for laser shock peening process simulation / H.K. Amarchinta, R.V. Grandhi, K. Langer, D.S. Stargel // *Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering*. 2009. Vol. 17, iss. 1. Art. 015010.
 136. Eigenstrain modelling of residual stress generated by arrays of laser shock peening shots and determination of the complete stress field using limited strain measurements / M. Achintha, D. Nowell, K. Shapiro, P.J. Withers // *Surface and Coatings Technology*. 2013. Vol. 216. P. 68–77.
 137. Fameso F., Desai D. Explicit analysis using time-dependent damping simulation of one-sided laser shock peening on martensitic steel turbine blades // *Simulation*. 2020. Vol. 96, iss. 12. P. 927–938.
 138. Simulation of laser shock peening on X12Cr steel using an alternate computational mechanical threshold stress plasticity model / Fameso F., Desai D., Kok S., Newby M., Glaser D. // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2020. Vol. 111, iss. 1/2. P. 1–11.
 139. Importance of microstructure modeling for additively manufactured metal post-process simulations / S. Sunny, G. Gleason, K. Bailey, R. Mathews, A. Malik // *International Journal of Engineering Science*. 2021. Vol. 166. Art. 103515.
 140. Ding H., Shin Y.C. Dislocation density-based modeling of subsurface grain refinement with laser-induced shock compression // *Computational Materials Science*. 2012. Vol. 53, iss. 1. P. 79–88.
 141. Numerical study on laser shock peening of TC4 titanium alloy based on the plate and blade model / C. Wang, K. Li, X. Hu, H. Yang, Y. Zhou // *Optics & Laser Technology*. 2021. Vol. 142. Art. 107163.
 142. Korsunsky A.M. Eigenstrain analysis of residual strains and stresses // *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. 2009. Vol. 44, iss. 1. P. 29–43.
 143. DeWald A.T., Hill M.R. Eigenstrain-based model for prediction of laser peening residual stresses in arbitrary three-dimensional bodies. Part 1: Model description // *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. 2009. Vol. 44, iss. 1. P. 1–11.
 144. Hu Y., Grandhi R.V. Efficient numerical prediction of residual stress and deformation for large-scale laser shock processing using the eigenstrain methodology // *Surface and Coatings Technology*. 2012. Vol. 206, iss. 15. P. 3374–3385.
 145. Korsunsky A.M. The modelling of residual stresses due to surface peening using eigenstrain distributions // *The Journal of Strain Analysis for Engineering Design*. 2005. Vol. 40, iss. 8. P. 817–824.
 146. Mechanical effects induced by shock waves generated by high energy laser pulses / J. Fournier, P. Ballard, P. Merrien, J. Barralis, L. Castex, R. Fabbro // *Journal de Physique III*. 1991. Vol. 1, no 9. P. 1467–1480.
 147. Application of design of experiments for laser shock peening process optimization / S. Chupakhin, B. Klusemann, N. Huber, N. Kashaev // *The International Journal of Advanced Manufacturing Technology*. 2019. Vol. 102, iss. 5/8. P. 1567–1581.

Материалы получены редакцией 25.05.2022