

---

---

**НАДЕЖНОСТЬ, ПРОЧНОСТЬ, ИЗНОСОСТОЙКОСТЬ  
МАШИН И КОНСТРУКЦИЙ**

---

---

УДК 666.11.01:539,4

**ТЕМПЕРАТУРНЫЕ ОСТАТОЧНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ  
ПРИ ЛАЗЕРНОЙ ИММЕРСИОННОЙ РЕЗКЕ МЕТАЛЛОВ**

© 2023 г. А. Ю. Албагачиев

*Институт машиноведения им. А.А. Благонравова, Москва, Россия**e-mail: albagachiev@yandex.ru*

Поступила в редакцию 30.10.2022 г.

После доработки 31.01.2023 г.

Принята к публикации 20.02.2023 г.

Показаны преимущества использования лазерного сверления и резки при получении отверстий в металлах. Приведены расчетные данные температуры и температурных остаточных напряжений при лазерной и лазерной иммерсионной резке.

*Ключевые слова:* лазерная резка, вода, нержавеющая сталь, нагрев, температура, напряжения

**DOI:** 10.31857/S0235711923030033, **EDN:** PPYDHC

Четвертая промышленная революция связана с цифровизацией производства, полной автоматизацией его подготовки и выполнения технологических операций обработки деталей машин. “Узким” местом в обработке деталей является мелкоразмерное сверление отверстий диаметром 0.1–5 мм жаропрочных, высокопрочных, легированных и вязких сталей и сплавов. Существует большой набор (весьма затратных) технологических методов обработки отверстий начиная от лазерной и эрозионной обработки до алмазного, твердосплавного и ультразвукового сверления. Наиболее распространенным способом получения мелкоразмерных отверстий является традиционное сверление серийными спиральными сверлами, который имеет следующие недостатки – низкую производительность, низкий уровень автоматизации и механизации и достаточно значимый уровень брака. Главным недостатком операции сверления является использование режимов обработки рекомендованных существующими номограммами, таблицами, справочниками, данными различных фирм, в том числе и зарубежных (sandvik, iskar, walter и т.д.), которые обеспечивают низкую стойкость и частые поломки малопрочного инструмента при обработке труднообрабатываемых материалов. Так, например, известно, что период стойкости до затупления у сверел, изготовленных из инструментальной стали Р6М5 ( $d \leq 5$  мм) при сверлении нержавеющей стали, составляет шесть минут.

На данный момент лазерное сверление и резка отверстий является наиболее перспективным методом получения всевозможных отверстий различного размера и геометрии практически на любой твердой поверхности, включая такие тугоплавкие материалы как вольфрам, рений, тантал, молибден и др. [1] (рис. 1).

В.С. Кондратенко и его школой разработан иммерсионный метод лазерной резки металлов [1, 2] с использованием ионизированной воды, при котором минимизированы энергозатраты за счет рационального использования мощности лазерного излучения при обеспечении высокого качества поверхности (остаточных напряжений) лазерного реза и прилегающих к нему поверхностей материала. В качестве источника

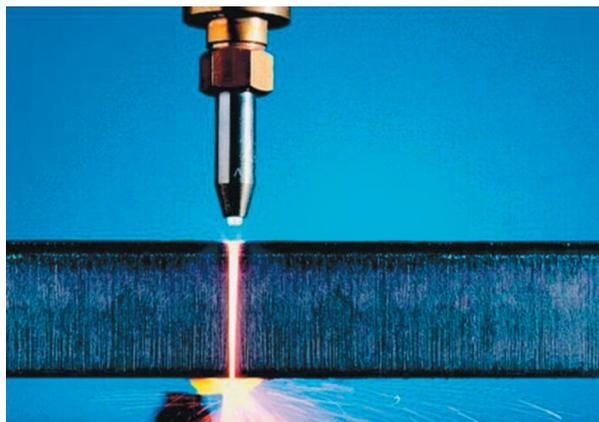


Рис. 1. Лазерная резка металлов.

излучения был использован пикосекундный Nd: YAG лазер Coherent Hyper Rapid 50W с длиной волны 1064 нм с пучком лазерного излучения диаметром порядка 28 мкм.

Использование наноионизированной воды в качестве иммерсионной жидкости [1] позволило избежать большие деформации материала, а процесс резки проходил без искр и горения металла, выбросов продуктов абляции и пара в окружающую среду. Результаты сверления отверстий в образцах из нержавеющей стали толщиной 0.05 мм следующие: используемая мощность излучения после объектива составила 35 Вт; частота 200 кГц; скорость сканирующего устройства 3000 мм/с; скорость перемещения по вертикальной оси  $Z$  – 50 мкм/с. Время, затраченное на вырезание одного отверстия, составило одну секунду.

В любой работе по лазерной обработке материалов перечисляются преимущества такой технологии. В их числе всегда говорится об отсутствии деформаций изделия после лазерного воздействия. Причиной этого называют локальность воздействия, очень малые времена термического цикла, малую глубину зоны термического влияния и т.п. При лазерном воздействии – в первую очередь термическом (речь идет о традиционных лазерных термических технологиях – закалке, легировании, наплавке, сварке, резке, маркировке и т.п.), в материалах (и, конечно, в металлах, о которых далее и пойдет речь) при высоких температурах происходят фазовые превращения, меняется их структура, изменяется кристаллическая решетка и внутренний объем кристаллической ячейки, возникают внутренние температурные напряжения и напряжения за счет структурно-фазовых превращений. Система становится неоднородной. В объекте лазерного воздействия (в обрабатываемой лазером детали) формируются участки с характеристиками, отличающимися от основного объема материала. Если их концентрации становится значительной и эти напряжения преодолевают некий порог прочности металла, то система (деталь, образец) становится неустойчивой и в результате деформируется. Тезис о бездеформационности лазерной обработки следует понимать так, что эти деформации могут быть гораздо меньше, чем при традиционных методах термической обработки металлов (может быть, даже на порядки). Но они есть, и задача технологов – понять их причины и свести их к минимуму, благо, что лазерный луч дает такие возможности. Настоящее исследование было проведено с целью выявления влияния режимов лазерной резки листовых металлических материалов на их устойчивость к возникновению остаточных напряжений. Трещины появляются под воздействием растягивающих остаточных напряжений возникающих в

Таблица 1. Физико-механические свойства стали 12Х18Н10Т

Материал	Плотность, кг/м <sup>3</sup>	Теплоемкость, Дж/кг °С	Температуро-проводность $a$ , 10 <sup>6</sup> м <sup>2</sup> /с	Прочность, МПа
сталь 12Х18Н10Т	7920	518	5	550

нержавеющей стали в результате быстрого охлаждения после импульсного нагрева. Рассмотрим распределение температуры нагрева при лазерной резке отверстия в стали 12Х18Н10Т (табл. 1) без хладагента и с его использованием.

Расчет распределения температуры от поверхности отверстия в радиальном направлении выполняли по формуле (1). Результаты расчета приведены на рис. 2

$$\Theta_c = \Theta e^{-\frac{z^2}{4at}}, \quad (1)$$

где  $\Theta$  – температура на контакте лазерный луч–металл;  $a$  – температуропроводность;  $t$  – время контакта луча с металлом.

Касательные напряжения, возникающие вокруг зоны облучения стали, растягивают материал и если остаточные напряжения  $\sigma > \sigma_p$  (где  $\sigma_p$  – предел прочности металла, 550 МПа для стали 12Х18Н10Т), то вероятность возникновения трещины высокая.

Расчеты остаточных температурных напряжений (рис. 3) выполняли по формуле (2)

$$\sigma = \alpha E \Theta \exp\left(-\frac{z^2}{4at}\right), \quad (2)$$

где  $\alpha$  – коэффициент линейного расширения;  $E$  – модуль упругости.

Как видно из рис. 2 максимальные контактные температуры между лазерным лучом и металлом в радиальном направлении при лазерной резке составляют 220 и 300°С температуры соответственно с имерсионной жидкостью и без нее. С увеличением расстояния перпендикулярно лучу в металл температуры снижаются, и снижается их разность и на расстоянии 300 мкм от контактной поверхности ее значения совпадают.

После лазерной резки без хладагента (рис. 3, кривая 1) растягивающие остаточные напряжения на поверхности достигают 920 МПа, критическое расстояние от поверх-

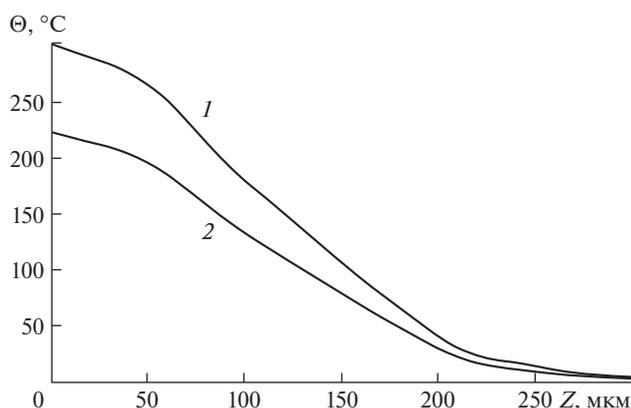
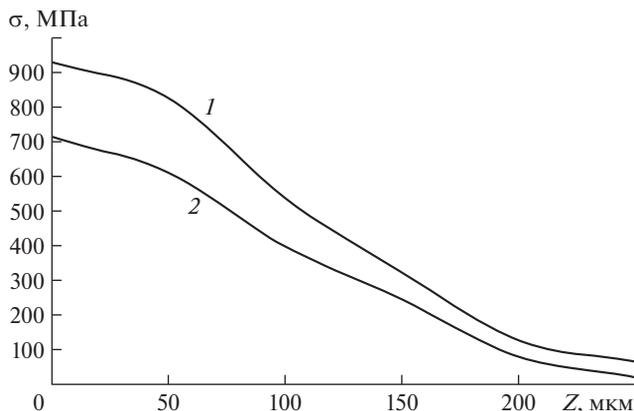


Рис. 2. Распределение температуры при лазерной резке: 1 – без хладагента; 2 – с иммерсионной жидкостью.



**Рис. 3.** Распределение остаточных напряжений после лазерной резки: 1 – без хладагента; 2 – с иммерсионной жидкостью.

ности отверстия в радиальном направлении, где могут развиваться трещины, составляет 120 мкм. При лазерной резке с использованием хладагента (рис. 3, кривая 2) поверхностные остаточные напряжения составляют 720 МПа, а критическая область трещинообразования снижается примерно вдвое – до 60 мкм. На расстоянии 300 мкм от поверхности отверстия они снижаются до 0 и дальше переходят в сжимающие остаточные напряжения.

**Выводы.** Сравнительный анализ лазерной обработки стали 12Х18Н10Т показал, что с помощью иммерсионной охлаждающей жидкости можно на 17% снизить температуру, на 30% поверхностные остаточные растягивающие напряжения и в 1.5 раза уменьшить расстояние вокруг отверстия, где они могут появиться.

#### БЛАГОДАРНОСТЬ

Автор выражает искреннюю благодарность сотрудникам Физико-технологического института РТУ МИРЭА профессору, д.т.н. В.С. Кондратенко и доценту, к.т.н. В.В. Кадомнину за участие в постановке задачи и обсуждении результатов исследований.

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Kondratenko V.S., Naumov A.S., Velikovskiy I.E.* Taiwan Patent 107129739, 2018.
2. *Кондратенко В.С., Лу Х.-Т., Наумов А.С., Великовский И.Э.* Лазерная резка кремниевых подложек изготовленных методом Таико // Прикладная физика. 2020. № 1. С. 71.
3. *Лу Х.-Т., Кондратенко В.С., Наумов А.С., Великовский И.Э., Зобов А.К.* Новая технология лазерной резки кремниевых подложек “ТАИКО” // Сборник докладов конференции “Оптические технологии, материалы и системы (Оптотех-2019)”; ФТИ Российского технологического университета / Под редакцией В.С. Кондратенко. М.: РТУ-МИРЭА, 2019. С. 16.
4. *Murakami R., Nakagawa H., Matsuo S.* Water-Assisted Laser Drilling for Miniature Internal Thread in Glass and Evaluation of Its Strength // J. of Laser Micro Nanoengineering. 2017. V. 12. № 3. P. 203.
5. *Arai Y., Sako T., Takebayashi Y.* Supercritical fluids: molecular interactions, physical properties and new applications. Berlin: Springer, 2002.