

УДК 621.8:621.373

ОСОБЕННОСТИ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКИ ЛИСТОВОЙ СТАЛИ И МОНИТОРИНГ КАЧЕСТВА ОБРАЗЦОВ ПОСЛЕ ЛАЗЕРНОГО ВОЗДЕЙСТВИЯ

В. И. Данилов*, Л. Б. Зуев*, Н. И. Кузнецова*,
А. Н. Малов, А. М. Оришич, В. М. Фомин, В. Б. Шулятьев

Институт теоретической и прикладной механики им. С. А. Христиановича СО РАН,
630090 Новосибирск

* Институт физики прочности и материаловедения СО РАН, 634021 Томск
E-mails: malex@itam.nsc.ru, dvi@ispms.tsc.ru

Представлено описание автоматизированного лазерного комплекса с квантовым генератором мощностью 8 кВт, качество пучка которого не хуже, чем у одномодового лазера. Показана возможность использования такого комплекса в заготовительном производстве для резки листовых углеродистых и нержавеющей сталей. Контроль качества материала заготовок показал, что его свойства соответствуют стандартам.

Ключевые слова: технологические газовые лазеры, самофильтрующие резонаторы, газолазерная резка листового металла, технологические параметры, структура и свойства заготовок.

Введение. Среди лазерных технологий, используемых в настоящее время в машиностроительных отраслях промышленности, наиболее широкое распространение получила газолазерная резка металлических и неметаллических материалов [1–3]. Особенно эффективным оказалось применение лазерной резки в заготовительном производстве [1]. Широкий диапазон толщин и марок разрезаемых материалов, практически любые параметры вырезаемых деталей позволяют изготавливать детали различных типоразмеров и геометрической сложности.

Основные преимущества лазерной резки следующие:

- повышение качества обработки за счет минимальных зон термического влияния, снижения тепловых деформаций, отсутствия силового воздействия инструмента на деталь;
- повышение скорости обработки (в несколько раз по сравнению с традиционными методами механообработки);
- сокращение в несколько раз затрат времени на подготовку производства при освоении выпуска новой продукции;
- увеличение коэффициента использования материала за счет внедрения системы оптимального раскроя;
- высокое качество реза конструкционных сталей, позволяющее во многих случаях производить сварку встык без предварительной механической обработки;
- отсутствие смещения кромок реза;
- возможность изготовления деталей с углублениями в виде острых углов, переходов без радиусов, тонких перемычек (толщиной менее 1–2 мм), а также получения отверстий малого диаметра (в отличие от высечки круглым универсальным инструментом).

Работа выполнена при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (код проекта 04-01-00798).

С помощью технологии лазерной резки можно производить раскрой листового материала по сложному контуру с точностью от 100 до нескольких микрон.

Современные лазерные раскройные комплексы позволяют выполнять раскрой тонколистовых материалов со скоростью до 120 м/мин с погрешностью не более 100 мкм. Для максимального увеличения толщины разрезаемых листов и скорости резки необходимо повышать мощность излучения лазера, поэтому в последние годы осуществляется промышленное освоение технологии лазерной резки на уровне мощности 5 ÷ 6 кВт.

Основные характеристики технологического лазера — его мощность и качество пучка. Как известно, требования высокой мощности и высокого качества пучка являются противоречивыми [4]. В большинстве промышленных лазеров применяются устойчивые резонаторы, поэтому в них при увеличении мощности излучения возбуждаются моды высших порядков, что приводит к ухудшению качества пучка. Для разрешения данного противоречия в [5] предложено применить в технологическом CO₂-лазере самофильтрующий резонатор (SFUR). При использовании такого резонатора авторам работ [6–8] удалось получить мощность излучения, большую, чем в лазере с одномодовым (TEM₀₀) резонатором такой же длины, и сохранить качество пучка, соответствующее лазеру с одномодовым резонатором.

В данной работе приводятся результаты разработки технологии лазерной резки с использованием мощного CO₂-лазера с самофильтрующим резонатором.

Экспериментальная установка и параметры резки металла. Для отработки технологии резки использовался автоматизированный лазерный технологический комплекс, созданный в Институте теоретической и прикладной механики СО РАН на основе непрерывного CO₂-лазера мощностью до 8 кВт [9–11]. В лазере применен многопроходный самофильтрующий резонатор, позволяющий формировать излучение с расходимостью, близкой к дифракционной при высокой мощности излучения [6–8].

Схема экспериментальной установки приведена на рис. 1. Диаметр пучка на входе в резак можно корректировать с помощью входящего в состав лучепровода зеркального телескопа. Излучение фокусируется с помощью линзы (ZnSe) с фокусным расстоянием 190,5 мм. Измерения распределения в фокусе линзы выполнялись методом вращающегося цилиндра [12]. На рис. 2 показано распределение интенсивности излучения в фокальном пятне пучка, при котором производилась резка (кривая 1). Измерения проводились при

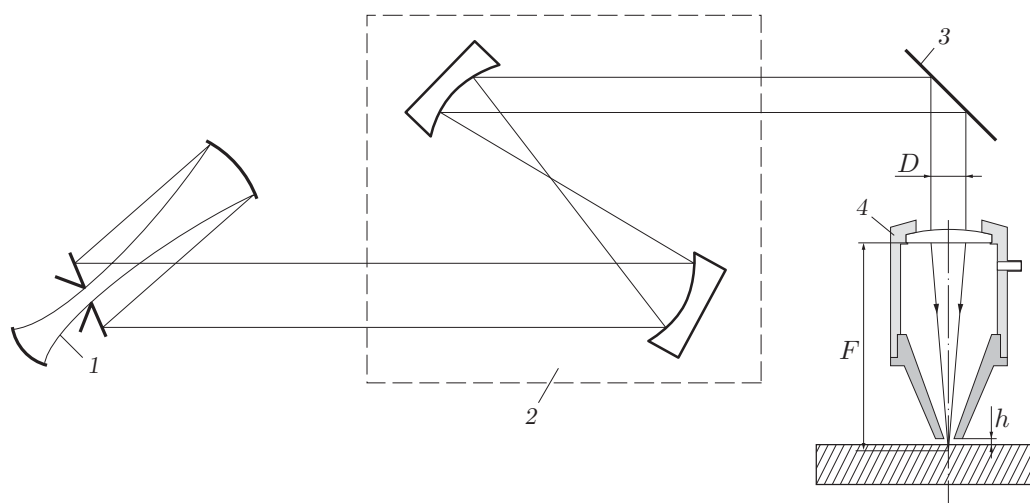


Рис. 1. Схема экспериментальной установки:

1 — лазер с самофильтрующим резонатором; 2 — лучепровод; 3 — поляризатор; 4 — резак

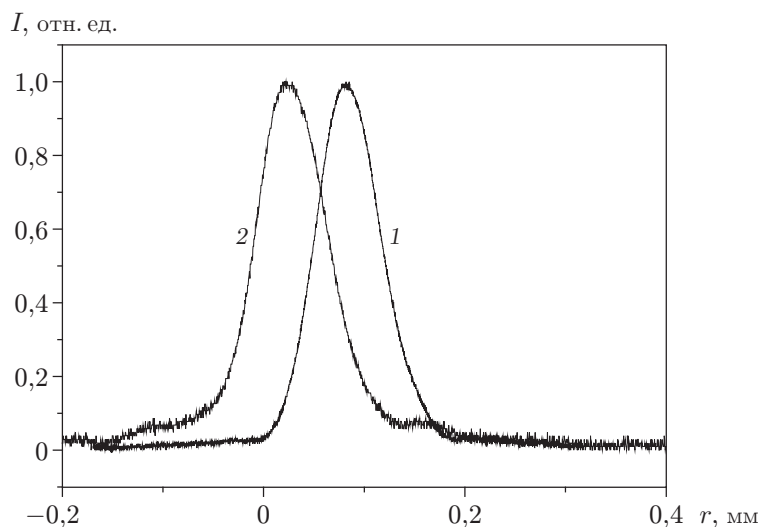


Рис. 2. Распределение интенсивности излучения в фокальном пятне:

1 — неискаженный пучок; 2 — пучок при наличии искажения

мощности излучения до 5,5 кВт. Форма распределения и размеры фокального пятна остаются неизменными во всем диапазоне мощности, а осевая интенсивность растет линейно с увеличением мощности [11]. В ходе экспериментов проводился периодический контроль распределения в фокальном пятне с целью выявления возможных искажений, вносимых фокусирующей линзой или элементами оптического тракта. На рис. 2 представлен также пример искаженного пучка (кривая 2). Такому распределению соответствует худшее качество реза. Эксперименты проводились только с неискаженным пучком.

Лазерный рез формировался совместным воздействием на металл лазерного пучка и струи кислорода. Струя создавалась в коническом сопле с углом сужения 30° . Для получения качественного реза в установке предусмотрена возможность изменения диаметра сопла в пределах $0,5 \div 3,0$ мм, давления газа (до 16 атм) и расположения фокуса линзы относительно плоскости разрезаемого листа. Для резки металла использовался технологический стол, обеспечивающий двухкоординатное программируемое перемещение резака со скоростью до 50 м/мин. Расстояние от среза сопла до плоскости листа устанавливалось и автоматически поддерживалось с помощью емкостного датчика. Диапазон размера зазора в режиме слежения составлял $100 \div 2000$ мкм.

В качестве экспериментальных материалов использовались углеродистая сталь Ст. 3 и нержавеющая сталь 12Х18Н10Т. Основной задачей исследований являлось установление зависимостей скорости резки, ширины реза и качества поверхности реза от мощности излучения. Выбор этих параметров обусловлен тем, что скорость резки определяет производительность комплекса, ширина реза — потери металла, а состояние поверхности реза — возможность использования деталей или заготовок без дополнительной механической обработки.

На рис. 3 приведены зависимости скорости резки углеродистой стали от мощности используемого излучения и толщины обрабатываемого материала. Измерялись верхняя и нижняя границы скорости. Верхняя граница определена как предельная скорость, при которой начинаются непрорезы и заплавы на листе, что приводит к значительному ухудшению качества нижней кромки разрезаемого материала. Нижняя граница скорости характеризуется возникновением автогенного режима резки и резким ухудшением качества

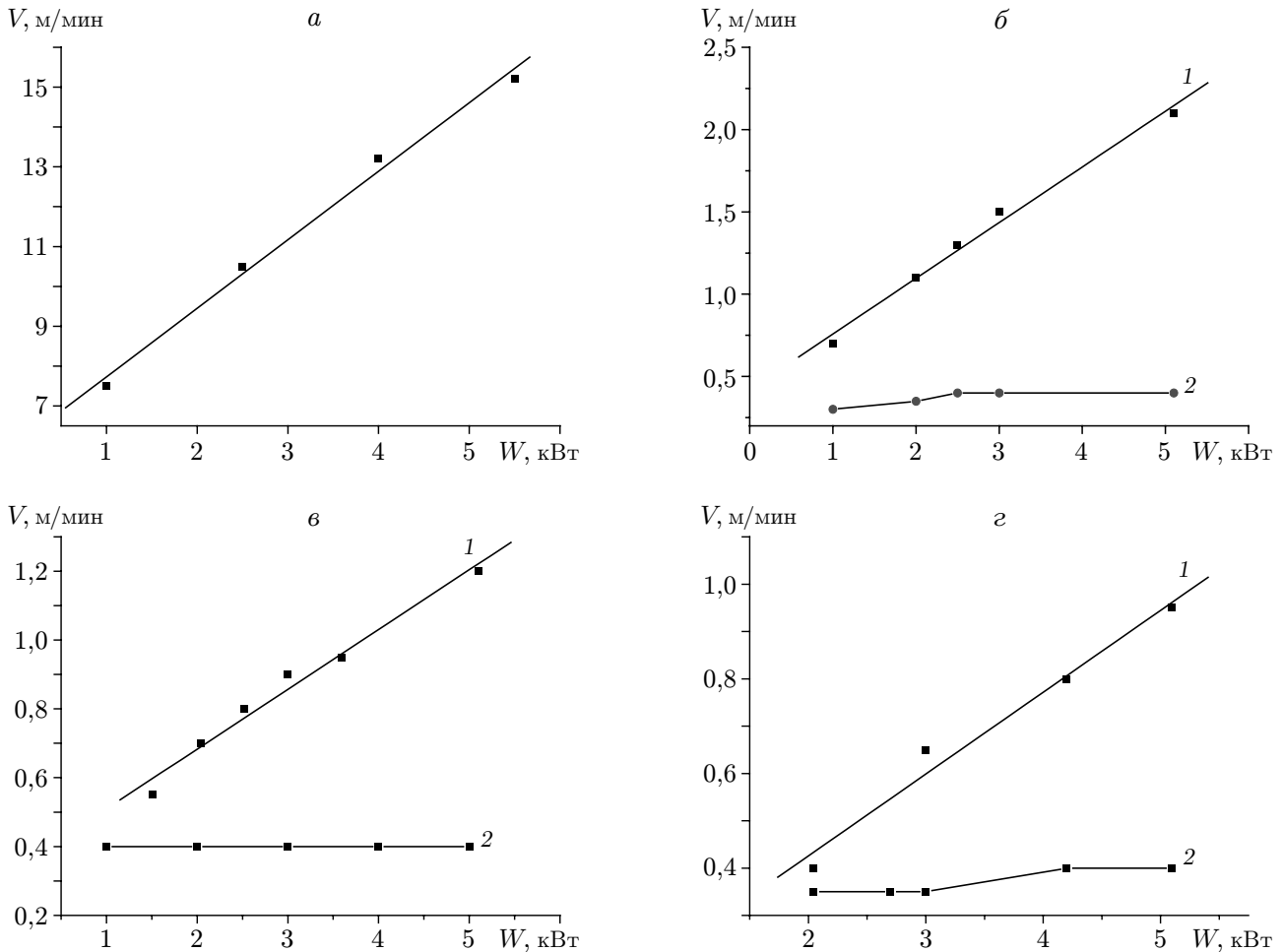


Рис. 3. Зависимости скорости резки от мощности излучения при различной толщине листа:
a — $d = 1,5$ мм; *б* — $d = 10$ мм; *в* — $d = 16$ мм; *г* — $d = 20$ мм; 1, 2 — верхняя и нижняя границы скорости резки

разрезаемой поверхности. На листе толщиной 1,5 мм нижнюю границу скорости зарегистрировать не удалось. На рис. 3 видно, что верхняя граница скорости резки линейно возрастает с увеличением мощности излучения, в то время как нижняя граница практически не меняется (для конкретной толщины материала). Естественно, что высокоскоростные режимы резки предпочтительнее с точки зрения производительности. Однако при окончательном выборе режима резки нужно учитывать чистоту плоскости реза.

Важным параметром реза является его ширина. Эта величина связана как с мощностью используемого излучения, так и со скоростью резки. На рис. 4 приведены зависимости ширины реза листовой стали Ст. 3 толщиной 5 мм от скорости при различной мощности излучения. Ширина реза уменьшается при увеличении скорости резки и возрастает при повышении мощности излучения (рис. 5). Проведенные измерения позволяют определить значения удельной энергии излучения при различной толщине разрезаемого материала $P = W/(Vdh)$. Согласно расчету удельная энергия, необходимая для нагрева до температуры плавления и расплавления единицы объема стали, составляет 12 Дж/мм³.

Удельная энергия излучения монотонно уменьшается с увеличением толщины разрезаемого материала (рис. 6). Однако измеренное значение P больше расчетного. Можно

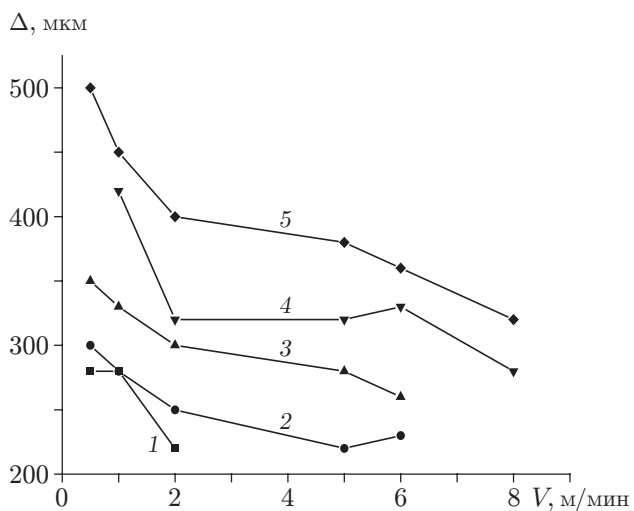


Рис. 4

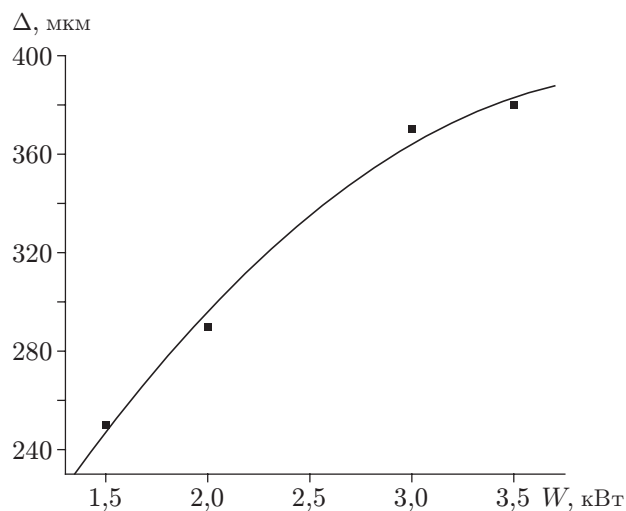


Рис. 5

Рис. 4. Зависимость ширины реза от скорости резки при различной мощности излучения ($d = 5$ мм):

1 — $W = 0,75$ кВт; 2 — $W = 1$ кВт; 3 — $W = 1,5$ кВт; 4 — $W = 2$ кВт; 5 — $W = 3,5$ кВт

Рис. 5. Зависимость ширины реза от мощности излучения ($d = 5$ мм, $V = 2$ м/мин)

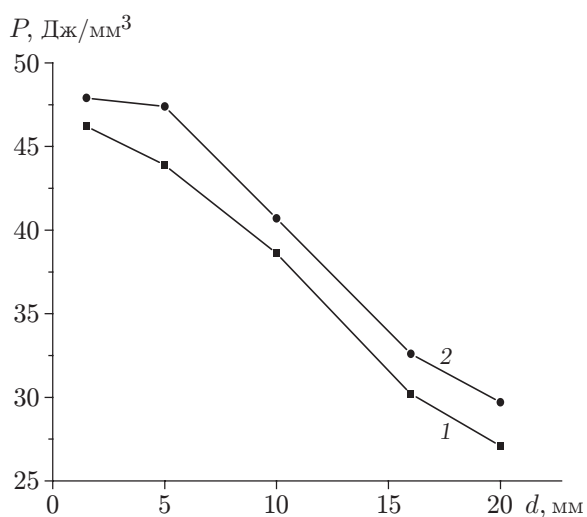


Рис. 6. Зависимость необходимого энерговклада от толщины металла при различной мощности излучения:

1 — $W = 2$ кВт; 2 — $W = 3,5$ кВт

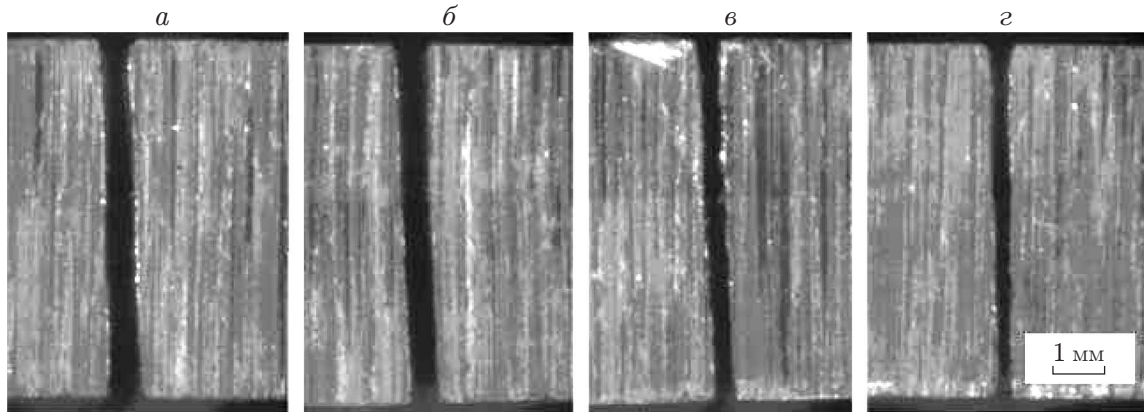


Рис. 7. Формы разрезов стали толщиной 5 мм при различной мощности излучения: а — $W = 3,5$ кВт; б — $W = 3$ кВт; в — $W = 2$ кВт; г — $W = 1,5$ кВт

предположить, что уменьшение удельной энергии излучения при резке заготовок большой толщины может быть обусловлено более эффективным использованием струи кислорода.

Для иллюстрации изменения геометрии реза в поперечном сечении на рис. 7 приведены фотографии разрезов стали толщиной 5 мм при скорости резки 1,2 м/мин, полученных при различной мощности излучения. На выходе наблюдается некоторое расширение канала резки. Четко прослеживается зависимость формы и ширины реза от мощности используемого излучения. Можно отметить также наличие расширяющихся и сужающихся участков резов и непрямолинейность границ.

Механические свойства и структура образцов после лазерной резки. Наиболее эффективна газолазерная резка тонколистового металла. Однако необходимо убедиться в том, что резка не оказывает негативного влияния на свойства обрабатываемого материала. Для проверки были изготовлены две партии листовых образцов после лазерной резки в среде кислорода. Первая партия: материал — сталь Ст. 3, толщина листа 1,5 мм; вторая партия: материал — сталь 12Х18Н10Т, толщина листа 1,0 мм. Исследовались образцы прямоугольной формы с размерами 100 × 10 мм. Образцы испытывались на растяжение на универсальной разрывной машине Instron-1185 при скорости деформирования $5 \cdot 10^{-4} \text{ с}^{-1}$ (скорость движения подвижного захвата 1 мм/мин). Температура испытания комнатная.

Установлено, что образцам из нержавеющей и углеродистой стали в выбранных условиях соответствуют деформационные кривые без особенностей типа “зуб” и “площадки текучести”, поэтому определялся условный, а не физический предел текучести [13].

Результаты механических испытаний образцов после лазерной резки приведены в табл. 1, 2. Временное сопротивление и относительное удлинение при разрыве стали Ст. 3 (табл. 1) удовлетворяют требованиям ГОСТ 16523-70: $\sigma_B = 370 \div 480$ МПа, $\delta \geq 22$ % [14]. Условный предел текучести для листовой стали Ст. 3 не регламентируется. Однако согласно [15] он не должен быть ниже 205 МПа. Механические свойства образцов из стали 12Х18Н10Т (табл. 2) существенно превышают требования ГОСТ 5582-75: $\sigma_{0,2} \geq 205$ МПа, $\sigma_B \geq 530$ МПа, $\delta \geq 40$ % [14]. Для одного образца из стали Ст. 3 значение $\sigma_{0,2}$ составляло менее 205 МПа, что могло быть обусловлено неблагоприятной микроструктурой материала, сформировавшейся после газолазерной резки.

Исследования микроструктуры проводились на поперечных шлифах. Способ изготовления шлифов традиционный: механическая шлифовка, механическая полировка алмазной пастой АСМ 10/71 НВЛ и химическое травление. Шлифы анализировались на микроскопе

Таблица 1

Механические характеристики образцов из стали Ст. 3

При наличии зоны термического влияния				В отсутствие зоны термического влияния			
Образец	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	Образец	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %
1	191,2	392,8	32,0	4	205,6	381,5	47,0
2	226,0	403,5	37,8	5	200,9	385,4	42,2
3	226,0	401,3	36,1	6	226,8	397,1	37,6
Среднее значение	214 ± 20	$399 \pm 5,5$	$35,3 \pm 3$	Среднее значение	211 ± 14	388 ± 8	$42,2 \pm 5$

Таблица 2

Механические характеристики образцов из стали 12Х18Н10Т

При наличии зоны термического влияния				В отсутствие зоны термического влияния			
Образец	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %	Образец	$\sigma_{0,2}$, МПа	σ_B , МПа	δ , %
1	431,5	886,8	80,8	6	403,0	877,0	80,0
2	449,2	869,7	77,6	7	385,8	868,2	76,4
3	—	876,3	74,8	8	427,9	875,0	81,6
4	451,3	868,4	59,0	9	407,6	872,2	77,6
5	447,3	868,4	76,4				
Среднее значение	444 ± 9	874 ± 8	$73,7 \pm 8$	Среднее значение	406 ± 17	873 ± 4	79 ± 2

Neophot-21. Образцы из стали Ст. 3 протравливались в 4 %-м спиртовом растворе HNO_3 , а образцы из стали 12Х18Н10Т — в “царской водке” (75 % HCl + 25 % HNO_3).

На рис. 8 видно, что структура образцов из стали Ст. 3 является феррито-перлитной. Зерна феррита и колонии перлита имеют полиэдрическое строение. Зона термического влияния травится сильнее и четко видна на микрофотографии. Результаты анализа структурных характеристик материала, представленных в табл. 3, позволяют сделать следующий вывод: в зоне термического влияния происходит существенное измельчение зерен, что, по-видимому, обуславливает повышение микротвердости почти в два раза.

Типичная структура образцов из стали 12Х18Н10Т представлена на рис. 9. Здесь также имеется зона термического влияния, но ее поперечный размер меньше, чем в образцах из стали Ст. 3 (примерно 75 мкм и 90 мкм соответственно). Измельчение зерна в зоне термического влияния меньше, чем в образцах из стали Ст. 3. Отметим также, что размер зерна основного металла в образцах из стали 12Х18Н10Т составлял приблизительно 5 мкм и был значительно меньше размера ферритного зерна в образцах из стали Ст. 3 (примерно 17 мкм).

Результаты микроструктурных исследований позволяют предположить, что на механические свойства образцов из стали Ст. 3 могло оказать воздействие наличие зоны термического влияния. Для проверки этого предположения у части образцов зона термического влияния удалялась фрезерованием (по 200 мкм с каждой длинной стороны). Затем на таких образцах определялись механические характеристики (см. табл. 1). Удаление зоны термического влияния практически не оказало воздействия на прочностные свойства стали Ст. 3. Можно лишь отметить увеличение пластичности приблизительно на 20 %. Некоторое уменьшение пластичности после лазерной резки, очевидно, обусловлено повышенной микротвердостью этой зоны (см. табл. 3). Однако в обоих состояниях осредненные механические характеристики удовлетворяют требованиям ГОСТ 16523-70. Наличие

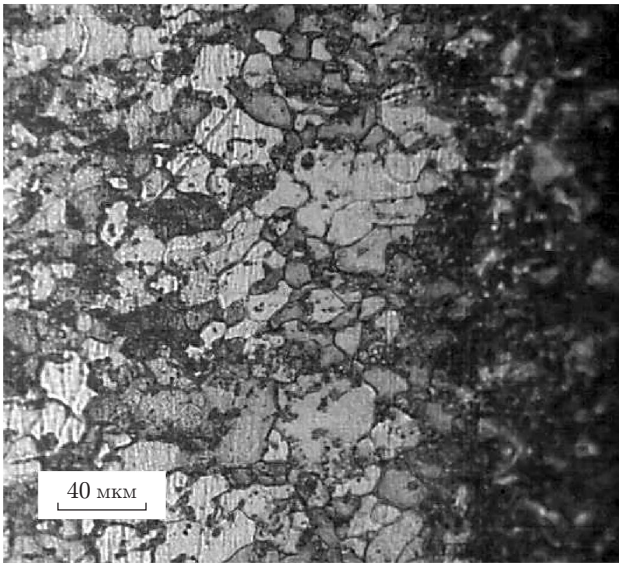


Рис. 8

Рис. 8. Микрофотография поперечного шлифа образца из стали Ст. 3 после лазерной резки

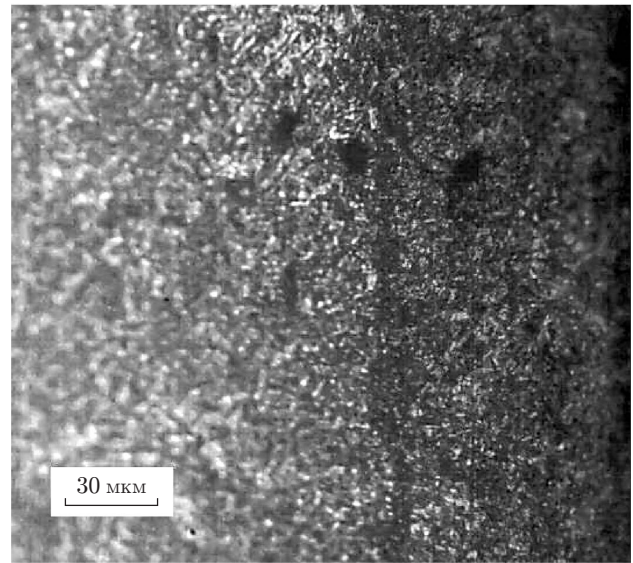


Рис. 9

Рис. 9. Микрофотография поперечного шлифа образца из стали 12X18H10T после лазерной резки

Таблица 3

Структурные характеристики образцов из стали Ст. 3 после газолазерной резки

Участок образца	a , мкм	b , мкм	H , МПа
Основной металл	17,1	$87,5 \pm 7$	1109 ± 118
Зона термического влияния	2,1	—	2077 ± 148

Примечание. a — средний размер ферритного зерна; b — ширина зоны термического влияния; H — микротвердость

образцов с достаточно низким условным пределом текучести обусловлено особенностью свойств исходного материала.

Аналогичная операция с образцами из стали 12X18H10T, как и следовало ожидать, никакого влияния на средние механические свойства материала не оказала (см. табл. 2).

Заключение. Разработанный в Институте теоретической и прикладной механики СО РАН автоматизированный технологический комплекс на основе CO_2 -лазера мощностью до 8 кВт с самофильтрующим резонатором может быть эффективно использован в заготовительном производстве для раскроя листовых углеродистых и специальных сталей. Такой комплекс позволяет по заданной программе производить вырезку заготовок толщиной до 20 мм со скоростью до 1 м/мин. При этом погрешность размеров заготовок не превышает 100 мкм и обеспечивается качество поверхности реза, при котором не требуется дополнительная механическая обработка. Контрольные исследования механических характеристик и микроструктуры материала заготовок после газолазерной резки показали, что эта операция не ухудшает свойств металла и поэтому не требует корректирующей финишной термической обработки.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Григорьянц А. Г., Соколов А. А.** Лазерная резка металлов. М.: Высш. шк., 1988.
2. **Steen William M.** Laser material processing. Berlin: Springer-Verlag, 1991.
3. **Игнатов А. Г., Суздаев И. В.** Состояние и перспективы применения лазерного технологического оборудования // Судостроит. пром-сть. Сер. Сварка. 1989. Вып. 7. С. 3–18.
4. **Ананьев Ю. А.** Оптические резонаторы и проблема расходимости лазерного излучения. М.: Наука, 1979.
5. **Gobbi P. G., Reali G. S.** A novel unstable resonator configuration with a self-filtering aperture // Optics Communic. 1984. V. 52. P. 195–198.
6. **Иванченко А. И., Крашенинников В. В., Пономаренко А. Г., Шулятьев В. Б.** Самофильтрующий резонатор в CO₂-лазере непрерывного действия // Квантовая электрон. 1989. Т. 16, № 2. С. 305–307.
7. **Грачев Г. Н., Иванченко А. И., Смирнов А. Л., Шулятьев В. Б.** Неустойчивый резонатор с пространственной фильтрацией излучения в технологическом CO₂-лазере // Квантовая электрон. 1991. Т. 18, № 1. С. 131–134.
8. **Иванченко А. И., Крашенинников В. В., Смирнов А. Л., Шулятьев В. Б.** Технологический лазер мощностью 3 кВт с высоким качеством излучения // Квантовая электрон. 1994. Т. 21, № 7. С. 643–647.
9. **Golyshev A. P., Ivanchenko A. I., Orishich A. M., Shulyatyev V. B.** Industrial lasers of power up to 10 kW with high quality of radiation // Intern. J. High Soc. Opt. Engng. 2001. V. 4184. P. 414–418.
10. **Afonin Yu. V., Filev V. F., Ivanchenko A. I., et al.** Automated laser technological complex for cutting with irradiation power of 8 kW // Intern. J. High Soc. Opt. Engng. 2003. V. 5479. P. 164–169.
11. **Афонин Ю. В., Гольшев А. П., Иванченко А. И. и др.** Генерация излучения с высоким качеством пучка в непрерывном CO₂-лазере мощностью 8 кВт // Квантовая электрон. 2004. Т. 34, № 4. С. 307–309.
12. **Lim G. C., Steen W. M.** Instrument for instantaneous in situ analysis of the mode structure of a high-power laser beam // J. Phys. Ser. E: Sci. Instr. 1984. V. 17. P. 999.
13. **Металловедение и термическая обработка стали: Справ. / Под ред. М. Л. Бернштейна, А. Г. Рахштадта.** М.: Металлургия, 1991. Т. 1.
14. **Марочник сталей и сплавов / Под ред. В. Г. Сорокина.** М.: Машиностроение, 1989.
15. **Марочник сталей и сплавов / Под ред. И. Р. Крянина.** М.: Центр. науч.-исслед. ин-т технологии машиностроения, 1977.

Поступила в редакцию 16/IX 2005 г.