

ОСТАТОЧНЫЕ ДЕФОРМАЦИИ И ДЕФЕКТЫ ПРИ ЛАЗЕРНОЙ РЕЗКЕ

В.С. Майоров, С.В. Майоров, М.Д. Хоменко, Р.В. Гришаев

Институт проблем лазерных и информационных технологий РАН, г. Шатура

E-mail: mvs-laser@list.ru , <http://www.laser.ru>

Введение.

В любой без исключения книге 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.

Но лазерное воздействие – в первую очередь термическое воздействие (речь идёт о традиционных лазерных термических технологиях – закалке, легировании, наплавке, сварке, резке, маркировке и т.п.). И обмануть природу нельзя. В материалах (и, конечно, в металлах – а о них далее и пойдёт речь) при высоких температурах происходят фазовые превращения, меняется их структура, изменяется кристаллическая решётка и внутренний объём кристаллической ячейки, возникают внутренние напряжения.

Система становится неоднородной. В объекте лазерного воздействия (в обрабатываемой лазером детали) формируются участки с характеристиками, отличающимися от основного объёма материала. Если их концентрация становится значительной и эти напряжения преодолевают некий порог, то система (деталь, образец) становится неустойчивой и в результате деформируется.

Тезис о бездеформационности лазерной обработки правильно 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 даёт такие возможности.

Настоящее исследование было проведено с целью выявления влияния режимов лазерной резки листовых металлических материалов на их устойчивость к возникновению остаточных деформаций. Одновременно исследовались и некоторые другие, более традиционные характеристики качества лазерной резки.

Лазерное оборудование.

Исследования предполагали изучение влияния разнообразных режимов и условий лазерной резки на показатели качества изготовленных деталей (образцов). Поэтому в наших экспериментах были задействованы различные

лазерные установки с возможностью широкого варьирования их параметров и технологических режимов. Основные серии экспериментов проводились на установке TRUMATIC-SL2530 с CO₂-лазером ($\lambda=10,6$ мкм, $P_{\text{лаз}} \leq 1500$ Вт) и установке «СПЕКТР-2» с АИГ-лазером ($\lambda=1,06$ мкм, $P_{\text{лаз}} \leq 400$ Вт). Обе установки могут работать как в импульсно-периодическом, так и в непрерывном режиме лазерного излучения, имеют прецизионную координатную систему, управление от ЧПУ, адаптивную лазерную головку с ёмкостным датчиком контроля зазора от детали, и др.

Методика и результаты экспериментальной оптимизации качества резки.

Предварительно определялись показатели качества резки (в первую очередь величина зоны термического влияния – ЗТВ, количество грата, шероховатость поверхности реза) в зависимости от режима лазерной резки.

Для этого использовалась специальная тест-программа, в которой при фиксированных параметрах лазерного излучения (постоянная мощность, длительность и скважность импульсов) от цикла к циклу скорость резки кратно увеличивалась. Мы от цикла к циклу скорость увеличивали примерно в $\sqrt{2}$ раз, что позволяет за 12 циклов пройти диапазон скоростей от 0,1 до 10 м/мин (величина скорости изменяется на 2 порядка). Получив при разных мощностях несколько таких треков (рис.1), даже визуально можно определить область режимов резки с хорошим качеством. Отметим, что это – очень удобный для практиков метод экспресс-диагностики и выбора достаточно верного режима лазерной резки для всей области изменений мощности $P_{\text{лаз}}$ и скорости V , ведь он требует всего несколько минут. Кроме того, можно определить максимально возможную скорость сквозного прорезания V_{max} в зависимости от мощности $P_{\text{лаз}}$.

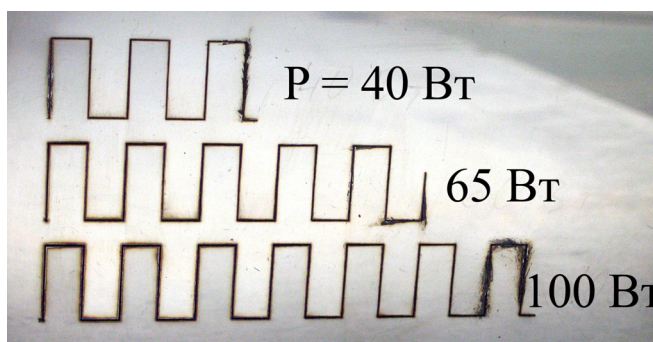


Рис.1. Треки тестовых резов для трёх мощностей излучения АИГ-лазера.

Получив при разных мощностях несколько таких треков (рис.1), даже визуально можно определить область режимов резки с хорошим качеством. Отметим, что это – очень удобный для практиков метод экспресс-диагностики и выбора достаточно верного режима лазерной резки для всей области изменений мощности $P_{\text{лаз}}$ и скорости V , ведь он требует всего несколько минут. Кроме того, можно определить максимально возможную скорость сквозного прорезания V_{max} в зависимости от мощности $P_{\text{лаз}}$.

Для экспериментов была выбрана нержавеющей сталь AISI-304 (российский аналог – 04X18Н10) толщиной 0,5-1,0 мм. Исследование полученных образцов объективными методами позволяет получить зависимости величины зоны термического влияния $D_{\text{зТВ}}$, величины грата G , шероховатости поверхности реза R_z от скорости резки $V_{\text{рез}}$ и от мощности лазерного излучения $P_{\text{лаз}}$. Несколько подобных зависимостей приведены на рис.2а – для непрерывного режима, и на рис.2б – для импульсно-периодического режима работы лазера.

Эксперименты показали, что максимальная скорость резки V_{\max} примерно линейно растёт с увеличением средней мощности и мало изменяется при переходе от непрерывного к импульсно-периодическому режиму генерации.

Скорость резки стали с кислородом на средних режимах примерно в два раза выше скорости резки с воздухом.

Основные различия проявляются в качестве и чистоте реза. При импульсно-периодическом

режиме величина ЗТВ и количество грата в несколько раз меньше, чем при непрерывном режиме излучения лазера. На больших скоростях шероховатость при непрерывном режиме меньше, чем при импульсном. С ростом скорости количество грата падает, достигает минимума при скорости $\sim 50\%$ от максимальной скорости прорезания, а затем несколько возрастает. Сходным образом ведёт себя и шероховатость. Повышение давления технологического газа в резачке приводит к снижению количества грата, а также позволяет лучше охлаждать кромки реза, сокращая время остывания металла и способствуя уменьшению ЗТВ. Увеличение мощности излучения при неизменной скорости приводит к укрупнению грата.

С ростом скорости ЗТВ уменьшается. Однако если для непрерывного режима кривые ЗТВ при разных мощностях проходят достаточно близко друг от друга (рис.2а), то в импульсно-периодическом режиме ЗТВ уменьшается при уменьшении мощности излучения (рис.2б). Это и понятно. Глубина проникновения тепла в материал $d \sim \sqrt{a\tau}$ (здесь a – температуропроводность, τ – время воздействия тепла). В непрерывном режиме $\tau \approx d_{\text{лаз}}/V$ и главным фактором является изменение скорости. В импульсно-периодическом режиме $\tau = \tau_{\text{имп}} = \text{const}$, а с уменьшением мощности вложение тепла уменьшается. В результате при проходе острых углов, где скорость падает из-за принципиальных инерционных свойств механики координатной системы, целесообразно от непрерывного режима переходить к импульсно-периодическому с пониженной средней мощностью.

Деформации тонколистовых изделий после лазерной резки

Величина ЗТВ сказывается на характере внутренних напряжений в вырезанной лазером детали и на её деформациях. В частности, в сталях в

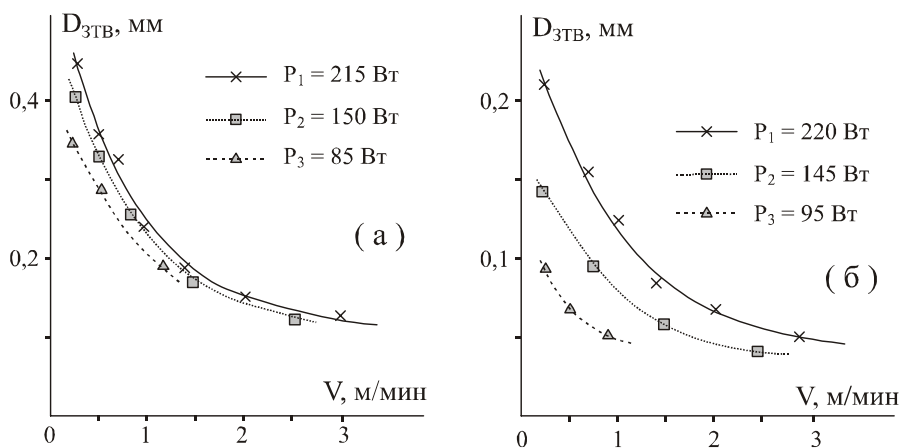


Рис.2. Влияние скорости резки и мощности излучения на величину ЗТВ. Толщина стали – 1 мм; газ – кислород. (а) – непрерывный, (б) – импульсно-периодический режимы.

результате нагрева выше температуры аустенизации и последующего быстрого охлаждения формируется кристаллическая решётка мартенсита, имеющая больший объём, чем исходная структура. На кромках лазерного реза возникают внутренние напряжения. Если деталь не очень большая и достаточно толстая, то эти напряжения не могут её деформировать и её геометрия сохраняется. Если же мы используем тонкий материал, то ситуация может кардинальным образом измениться. Отметим, что понятие «тонкий» и «толстый» - относительно. Главное – соотношение между толщиной листового материала и габаритами вырезанных лазером участков.

Было проведено несколько серий экспериментов. Снова использовалась нержавеющая сталь AISI-304 с полированной поверхностью (полировка ВА, т.е. сталь холоднокатаная зеркальная, с обжигом в вертикальной печи с применением едкого аммиака). В разных сериях толщина металла была от 0,5 до 1 мм. Лазерная резка производилась на различных режимах. Образцами для исследований служили вырезанные лазером круги различного диаметра D . Измерялась их деформация Δ , а именно абсолютная деформация (смещение центра детали от линии плоскостности) и средний радиус кривизны R образца – таб.1. Измерения проводились с помощью интерферометра ZYGO GPI XP/D (именно для регистрации отражения и использовалась для образцов полированная сталь).

Таб.1. Характеристики деформации образцов, вырезанных лазером. Материал – нержавеющая сталь AISI-304 толщиной $\delta = 0,5$ мм; режим генерации лазера – непрерывный, $P_{\text{лаз}} = 110$ Вт, $\lambda = 1,06$ мкм; $V_{\text{рез}} = 0,2$ м/мин; технологический газ – кислород при $p = 2$ атм.

Номер образца №	1	2	3	4	5	6
Диаметр образца D , мм	20	40	60	80	120	160
Отношение D/δ	40	80	120	160	240	320
Деформация Δ , мм	~ 0	0,03	0,30	0,57	1,00	1,39
Радиус кривизны R , м	> 10	6,4	1,5	1,40	1,8	2,3

Ясно видно, что главным параметром является отношение размера изделия к его толщине - D/δ . Если $D/\delta < 50$, то образцы практически не деформировались и сохранили свою плоскостность. Диапазон $50 < D/\delta < 100$ является переходным и в определённой степени нестабильным; в этой области деформации становятся заметными и постепенно возрастают; деталь теряет устойчивость. Область $D/\delta > 100$ можно назвать областью насыщения неустойчивости. Радиус кривизны образцов становится минимальным (сильная деформация) и мало меняется, но всё же несколько увеличиваясь при дальнейшем росте параметра D/δ . Отметим, что такие сильные деформации связаны с тем, что здесь мы специально взяли неоптимальный режим лазерной резки с большой величиной ЗТВ.

Вообще же связь деформаций и потерей плоскостности деталей с режимами лазерной обработки является сложной многофакторной задачей. При непрерывном режиме и скоростях < 1 м/мин наблюдается потеря плоскостности деталей, которая исчезает при скоростях $> 2...3$ м/мин. При импульсно-периодическом режиме со скважностью > 10 детали как правило не

деформируются при любых скоростях резки. Конечно, играет роль и насыщенность изделия внутренними вырезанными участками.

Выводы и рекомендации

Полученные данные позволяют сказать, что наилучшее качество лазерной резки даёт импульсно-периодический режим, но максимальную производительность при достаточно хорошем качестве обеспечивает непрерывный режим генерации лазера. При этом главное, чтобы был достаточный запас мощности излучения лазера и быстродействующие мощные приводы координатной системы с хорошей динамикой. А на острых углах – плавный переход в импульсно-периодический режим с управляемой от ЧПУ мощностью лазера. Такие режимы обеспечивают минимальную величину ЗТВ и способствуют отсутствию деформаций у вырезанных лазером изделий.