

ПРИЧИНЫ ОБРАЗОВАНИЯ ДЕФЕКТОВ ПРИ ПОВЕРХНОСТНОМ УПРОЧНЕНИИ СТАЛЕЙ И СПЛАВОВ ВЫСОКОКОНЦЕНТРИРОВАННЫМИ ИСТОЧНИКАМИ НАГРЕВА

С. С. САМОТУГИН, д-р техн. наук, В. А. МАЗУР, инж. (Приазов. гос. техн. ун-т, г. Мариуполь)

Рассмотрены причины образования дефектов в поверхностных слоях инструментальных сталей в результате обработки изделий высококонцентрированными источниками нагрева. Отмечены особенности образования дефектов при лазерной и плазменной обработке. Предложены пути снижения вероятности дефектообразования.

Ключевые слова: термическое упрочнение, источники нагрева, лазерный и электронный луч, плазменная струя, фазовые и структурные превращения, дефекты

Для повышения износостойкости деталей машин и инструмента широкое распространение получили методы поверхностного термического упрочнения высококонцентрированными ($10^5 \dots 10^7$ Вт/см²) источниками нагрева — лазерным и электронным лучами, плазменной струей. Высокие значения плотности мощности данных источников позволяют получить качественно новые свойства поверхности металлов, недостижимые при традиционных методах термической обработки. Эффект обусловлен образованием в поверхностном слое нанокристаллической метастабильной структуры с повышенной дисперсностью блоков и плотностью дислокаций. В то же время в таких условиях сверхскоростного (так называемого шокового) упрочнения имеются предпосылки для образования и развития дефектов (трещин, пор, включений), появление которых обусловлено неравномерным и локальным тепловым воздействием. При этом вероятность возникновения и степень развития дефектов зависят как от состава материала и его исходного состояния, так и от способа и режима обработки.

На практике в большинстве случаев лазерное упрочнение выполняется с оплавлением поверхности изделий. Это связано с целым рядом особенностей взаимодействия лазерного излучения с металлами — относительно малой глубиной упрочненного слоя (зоны лазерного воздействия (ЗЛВ)) при обработке с нагревом до температуры, ниже температуры плавления; низким КПД лазерной обработки (до 10 %) при упрочнении без оплавления и без применения специальных поглощающих покрытий; достижением наиболее высоких значений эксплуатационных свойств (прежде всего твердости) благодаря сверхскоростной

кристаллизации и закалке переплавленного слоя. В связи с чрезвычайно высокой скоростью кристаллизации расплава, несмотря на дисперсность кристаллической структуры, при лазерном оплавлении велика вероятность образования кристаллизационных (горячих) трещин [1–4]. Особенно склонны к образованию трещин при лазерной обработке высокоуглеродистые и легированные инструментальные стали [1, 3, 4], а также чугуны [1, 5].

Одной из причин, вызывающих появление трещин при лазерном оплавлении, является высокий уровень и неблагоприятное распределение внутренних остаточных напряжений. При лазерной обработке инструментальных сталей происходит практически полное растворение карбидной фазы. Жидкий раствор насыщается углеродом и легирующими элементами. При сверхскоростном охлаждении закристаллизовавшегося металла аустенит в металле ЗЛВ становится устойчивым к $\gamma \rightarrow \alpha$ -распаду (уменьшается температурный интервал начала и конца мартенситного превращения $M_n \dots M_k$). Вследствие этого основной структурной составляющей в металле ЗЛВ является остаточный аустенит, а в оплавленном слое образуются остаточные напряжения растяжения [5], способствующие образованию трещин [4].

Высокая склонность к образованию кристаллизационных трещин при лазерном оплавлении серого чугуна также обусловлена наличием значительных внутренних напряжений. При этом наряду с трещинообразованием происходит и образование пор в оплавленном слое, связанное с неполным растворением графита в расплаве ввиду очень высокой скорости нагрева и кристаллизации. Микропузырьки газов, выделяющиеся из глубинных слоев расплава, адсорбируются на оставшихся частицах графита. Наибольшее количество пор образуется при высокой скорости обра-

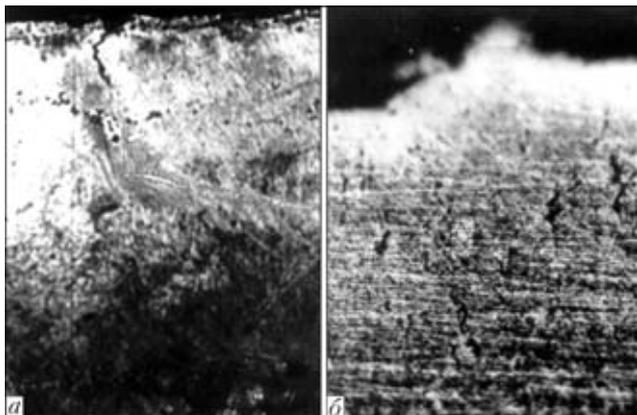


Рис. 1. Микршлифы оплавленных слоев с кристаллизационной трещиной и микропорами при обработке стали 150XHM непрерывным лазерным излучением мощностью 1,2 кВт, $\times 100$ (а) и с кристаллизационными трещинами и включениями при лазерной обработке стали 45, $\times 320$ (б)

ботки и высокой плотности мощности лазерного излучения [6].

Кроме неблагоприятных остаточных напряжений, другой важной причиной образования кристаллизационных трещин при лазерном оплавлении как сталей, так и чугунов является наличие в исходном металле значительного количества неметаллических включений. Детально влияние включений на возникновение и развитие трещин в металле ЗЛВ изучено в работе [6]. Установлено, что энергии излучения достаточно для оплавления тугоплавких включений Cr_2O_3 , Al_2O_3 , TiN , SiO_2 и для развития диффузионных процессов через межфазные границы включений с матрицей. В результате диффузии зоны матрицы окружающие включения насыщаются компонентами включений, которые при резком охлаждении фиксируются в твердом растворе. Следовательно, локальные участки матрицы вокруг включений представляют собой сильно пересыщенные твердые растворы. В таких условиях на границах раздела с матрицей образуются значительные термические напряжения и, как следствие, кристаллизационные трещины. Характер микроразрушения зависит от формы включений: вблизи компактных включений трещины имеют меньшую протяженность в отличие от распространения их вдоль пленочных включений. Очагом зарождения трещины, показанной на рис. 1, а, явилась частица пластинчатого цементита с вкрапленным шаровидным графитом. Микротрещина, окруженная цепочкой микропор и надрывов, выходит на поверхность оплавленного слоя и постепенно останавливается на границе оплавленного слоя со слоем закалки в твердом состоянии. Кристаллизационные трещины, выходящие на поверхность оплавленного слоя, легко выявляются визуально.

Значительно большую опасность представляют внутренние кристаллизационные микротрещины, не выходящие на поверхность и не выявляемые

такими неразрушающими методами контроля, как ультразвуковой, магнитный, лучевая дефектоскопия (рис. 1, б). Микротрещины, инициируемые неметаллическими включениями, развиваются практически в вертикальном направлении, соответствующем направлению теплоотода при скоростной кристаллизации. Размер трещин очень мал и на поверхность выходят только трещины у включений, расположенных непосредственно под поверхностью.

Как выходящие на поверхность, так и внутренние кристаллизационные трещины весьма опасны, поскольку могут стать очагами макро-разрушения упрочненных изделий в процессе эксплуатации. Следует отметить, что кристаллизационные (горячие) трещины при лазерной обработке обычно не распространяются вглубь изделия, а останавливаются либо на границе оплавленного слоя с закаленным (рис. 1, а), либо на границе закаленного слоя с исходным металлом.

Гораздо большую опасность представляют собой закалочные (холодные) трещины, которые уже на стадии упрочнения могут распространяться далеко вглубь исходного металла изделия вплоть до его полного разрушения.

Фазовые и структурные превращения при плазменном нагреве металлов имеют как общие закономерности с превращениями при лазерном нагреве, так и специфические. При обработке без оплавления, т. е. с закалкой в твердой фазе, механизмы превращений и структура упрочненной зоны при лазерной и плазменной обработке практически одинаковы [1, 5, 7]. Однако при обработке с оплавлением в характере скоростной кристаллизации и структуре оплавленного слоя для этих способов обработки имеются существенные различия [8].

При достаточном энерговлечении лазерный нагрев сталей и сплавов вызывает локальное расплавление поверхностных микрообъемов. Ванна жидкого металла практически полностью сохраняется за счет сил поверхностного натяжения. Некоторое ухудшение качества поверхности (повышение шероховатости) допустимо для большинства типов деталей или инструмента и легко устраняется дополнительной механической обработкой. При нагреве высококонцентрированной плазменной струей поверхностное оплавление с сохранением ванны жидкого металла возможно только в узком диапазоне режимов обработки: при нагреве поверхностного слоя до температуры $T_{\text{пл}} \dots T_{\text{пл}} + 100$ °С [8]. В этом случае глубина оплавленной зоны не превышает 100 мкм, т. е. можно говорить лишь о поверхностном микрооплавлении. При повышении энерговлечения и соответственно температуры нагрева происходит расплавление значительных объемов металла, увеличение объема жидкой ванны, газодинамического

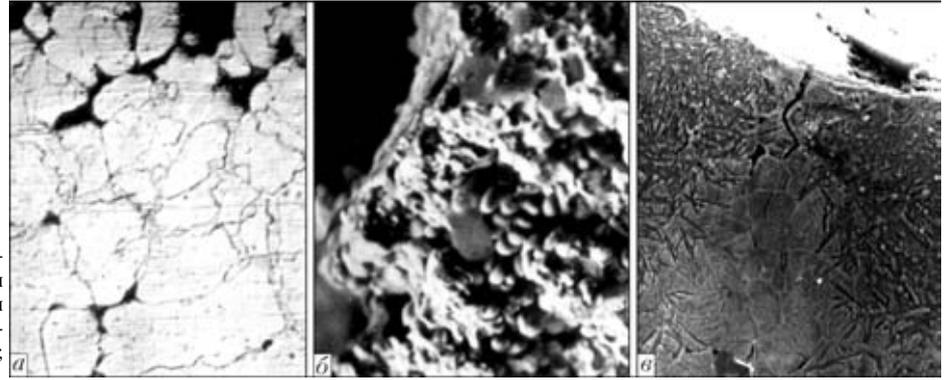


Рис. 2. Микроструктура (а, в) и характер разрушения (б) оплавленного слоя с кристаллизационными трещинами при плазменном макрооплавлении сталей Р6М5 (а, б) и 90ХФ (в); а — $\times 500$; б — $\times 340$; в — $\times 320$

воздействия плазменной струи над силами поверхностного натяжения, в результате происходит выплеск части расплавленного металла. Глубина зоны плазменного макрооплавления может достигать 1 мм, однако при этом примерно такую же глубину имеет лунка от выплеснувшегося металла, что резко ухудшает качество поверхности и требует дополнительной механической обработки. Следовательно, плазменное упрочнение с макрооплавлением поверхности можно применять лишь в ограниченных случаях, например, при необходимости увеличения глубины упрочненного слоя или создании специального поверхностного рельефа.

Влияние плазменного микро- и макрооплавления на механические свойства, в частности, динамическую трещиностойкость, неоднозначно и зависит от состава сталей и сплавов и их исходного состояния. Для высокоуглеродистых и инструментальных сталей, серого чугуна и спеченных твердых сплавов [7] при плазменном микро- и особенно макрооплавлении происходит резкое охрупчивание поверхности (снижение ударной вязкости и динамической вязкости разрушения). Разрушение металла оплавленной зоны происходит по механизму интеркристаллитного скола. Даже при отсутствии дефектов (трещин, пор) наличие такого хрупкого слоя на поверхности деталей или инструмента нежелательно, поэтому для изделий из высокоуглеродистых и инструментальных сталей, чугуна, твердых сплавов предпочтительнее плазменная закалка без оплавления поверхности. Однако в ряде случаев обработка с плазменным микрооплавлением может быть более перспективной [9]. Например, использование плазменной обработки с микро- или макрооплавлением для низкоуглеродистых сталей или наплавленного металла, когда одновременно с увеличением износостойкости ударная вязкость и динамическая вязкость разрушения также резко повышаются, а разрушение оплавленного слоя происходит по микровязкому ямочному механизму [7].

По характеру разрушения металла оплавленного слоя можно судить и о потенциальной склонности упрочняемого материала к кристаллиза-

ционным трещинам при плазменном оплавлении. В случае образования высокодисперсной структуры с характерными для нее квазисколом или микровязким ямочным механизмами разрушения кристаллизационные трещины при плазменном оплавлении обычно не образуются. Горячие трещины могут наблюдаться в случае образования крупноиглочатого мартенсита и разрушения по механизму интеркристаллитного скола. В качестве примера на рис. 2, а, б показана микроструктура и поверхность разрушения стали Р6М5 при плазменном макрооплавлении. Кристаллизационные микротрещины образуются по границам оплавленных зерен, расположены хаотически, ориентированы преимущественно в вертикальном направлении и могут быть как внутренними, так и выходящими на поверхность (рис. 2, а). В очагах образования трещин наблюдаются поры и неметаллические включения компактной и пленочной морфологии (рис. 2, б). Следует отметить, что строение поверхности горячей трещины в дисковом ноже из стали Х12М, образованной в процессе плазменного упрочнения режущей кромки по боковой поверхности (рис. 3, б), в целом аналогично строению горячих трещин, наблюдаемых при сварке [10], что свидетельствует об общих закономерностях их образования и развития. Значительно более высокая (практически на порядок) степень дисперсности металла упрочненной зоны способствует образованию дисперсного излома с большим количеством оплавленных кристаллитов, пор и включений (рис. 2, б). Аналогичный характер развития горячих трещин наблюдается и при плазменном оплавлении низколегированной инструментальной стали 90ХФ (рис. 2, в).

Как отмечалось выше, при поверхностном упрочнении высококонцентрированными источниками нагрева наряду с кристаллизационными трещинами в упрочненном слое могут возникать и закалочные (холодные) трещины. Они могут наблюдаться как при обработке с оплавлением поверхности, так и при обработке (закалке) без оплавления. Снижение технологической прочности в данном случае связано не столько с физико-металлургическим воздействием лазерного луча

или плазменной струи, сколько с напряженным состоянием упрочняемых изделий в процессе обработки.

На рис. 3, *а* показана закалочная трещина, образовавшаяся в подповерхностной зоне оплавленного слоя при плазменном макроплавлении валков трубосварочного стана из стали 90ХФ. Из очага разрушения закалочные трещины разветвляются, а одна из них выходит на поверхность.

Возникновение закалочных напряжений при поверхностной закалке обусловлено резким перепадом температуры по сечению изделия. Внутренние напряжения могут достигать по значению предела текучести стали и вызывать образование закалочных (холодных) макротрещин. Наиболее подвержены растрескиванию при упрочнении детали и инструмент сложной формы, особенно кольцевой с конструктивными концентраторами напряжений (прокатные валки (рис. 3, *а*), дисковые ножи (рис. 3, *б*), фрезы, пилы, матрицы, шайбы и т. п.). Радиальные сквозные и несквозные трещины могут зарождаться и распространяться как от упрочненной поверхности к осевому отверстию, так и у осевого отверстия у концентратора, например, шпоночного паза. Растрескивание может происходить непосредственно в процессе упрочнения или при естественном остывании упрочненного изделия. В большинстве случаев упрочненные изделия с закалочными трещинами (даже несквозными) бракуются. В этой связи возникает необходимость принятия специальных мер для предотвращения хрупкого разрушения деталей и инструмента при упрочнении [11].

Таким образом, суммарные закалочные напряжения на стадии охлаждения определяются составом упрочняемой стали. Наиболее опасное их сочетание для наружных слоев реализуется при упрочнении деталей и инструмента из легированных сталей, а для внутренних (у осевого отверстия) — при упрочнении деталей и инструмента из углеродистых сталей. Конструктивные концентраторы

напряжений локализуют и облегчают хрупкое разрушение инструмента при упрочнении.

В соответствии с установленными механизмами образования закалочных трещин возможно два пути их предотвращения: релаксация напряжений от объемной закалки путем повышения температуры промежуточного объемного отпуска и снижение закалочных напряжений при упрочнении путем регулирования термического цикла плазменного нагрева.

Повышение температуры отпуска после предварительной объемной закалки до 400...600 °С (в зависимости от марки стали) должно способствовать, во-первых, снятию напряжений от объемной закалки и, во-вторых, сохранению твердости сердцевины на уровне *HRC* 45...55 и соответственно высокой объемной конструктивной прочности стали.

Термический цикл плазменного нагрева должен обеспечивать быстрое охлаждение в температурном интервале наименьшей устойчивости переохлажденного аустенита (650...400 °С) и медленное охлаждение в интервале температур ниже мартенситной точки M_n (для большинства сталей 200...300 °С). Это позволит снизить термические и структурные (в момент образования хрупкой фазы — мартенсита) напряжения. На практике такое регулирование термического цикла легко достигается с использованием предварительного объемного подогрева изделий непосредственно перед плазменным упрочнением до температуры, на 20...50 °С ниже M_n для данной марки стали. Естественное охлаждение подогретого изделия после плазменного упрочнения не только замедляется в температурном интервале образования закалочных трещин, но и происходит равномерно по всему объему металла, что также способствует снижению общего уровня закалочных напряжений. Рекомендуемая температура предварительного подогрева практически не оказывает влияния на значения скорости нагрева, скорости охлаждения и продолжительности выдержки в области высоких температур, которые определяют характер превращений и уровень достигаемых механических свойств после упрочнения высококонцентрированным источником нагрева.

Рекомендации по регулированию уровня закалочных напряжений реализованы при разработке технологии плазменного упрочнения дисковых ножей диаметром 203 мм толщиной 12 мм из стали Х12М для порезки трансформаторного листа (см. рис. 3, *б*) [11].

В заключение можно отметить, что при поверхностном упрочнении деталей высококонцентрированными источниками нагрева при обработке с оплавлением

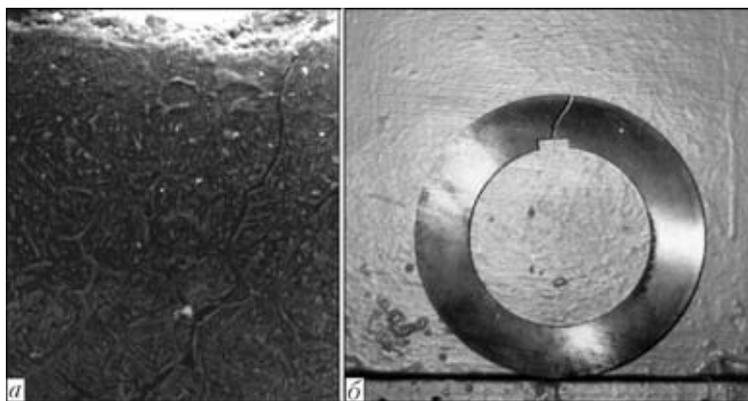


Рис. 3. Микроструктура оплавленного слоя с закалочными трещинами при плазменной обработке стали 90ХФ с макроплавлением, $\times 320$ (*а*); трещина в дисковом ноже из стали Х12М для порезки трансформаторного листа (*б*)

поверхности могут образовываться кристаллизационные (горячие) трещины и микропоры, а также закалочные (холодные) трещины как при обработке с оплавлением, так и без оплавления поверхности. Тщательный выбор режимов упрочнения и применение дополнительных технологических мероприятий позволяют практически во всех случаях предотвратить образование трещин.

При поверхностном упрочнении высококонцентрированными источниками нагрева не используется дополнительное введение в зону обработки присадочных материалов (если речь не идет о специальных технологических процессах лазерного и плазменного поверхностного легирования или нанесения покрытий). Поэтому при лазерном или плазменном упрочнении нет металлургических факторов, влияющих на образование неметаллических включений в металле упрочненной зоны. Однако очагами зарождения трещин в процессе обработки могут стать уже имеющиеся в исходном металле включения (особенно при обработке легированных сталей и сплавов, чугуна).

1. Леонтьев П. А., Чеканова Н. Т., Хан М. Г. Лазерная поверхностная обработка металлов и сплавов. — М.: Металлургия, 1986. — 142 с.

The paper deals with the causes of defect formation in the surface layers of tool steels as a result of processing by high power density heat sources and features of defect formation in laser and plasma treatment. Methods to lower the probability of defect formation are proposed.

Поступила в редакцию 21.09.2006



VI Международная специализированная выставка «СВАРКА-2007» совместно с выставкой «Машиностроение, станки, инструменты»

26–29 июня 2007 г.

г. Нижний Новгород

Тематика сварочной выставки

- Оборудование и оснастка для контактной сварки
- Оборудование для специализированных способов сварки
- Машины и оборудование для дуговой сварки и резки, источники питания, приспособления и инструменты, оборудование для плазменной обработки металлов
- Машины и оборудование для газовой сварки, вспомогательный инструмент
- Оборудование, приспособления и инструменты для сварки в среде защитного газа
- Оборудование для подготовки поверхности
- Автоматические системы управления для сварочных процессов
- Роботы и робототехнические комплексы
- Измерение, контроль, испытания, обработка данных
- Средства защиты сварщиков и охрана окружающей среды
- Научное и информационное обеспечение

ВЗАО «Нижегородская ярмарка»

г. Нижний Новгород, ул. Совнаркомовская, 13, оф. 220

Директор — А. А. Коропченко, тел.: (8312) 77 54 96; факс: 77 55 86; 77 54 89; E-mail: kaa@jarmarka.ru
Контакты — тел.: (8312) 77 55 89 (С. Г. Левин), E-mail: levin@jarmarka.ru, http://www.jarmarka.ru