

<https://doi.org/10.26160/2474-5901-2024-41-60-65>

ПОВЫШЕНИЕ ПРОЧНОСТИ КОНСТРУКЦИОННЫХ СТРОИТЕЛЬНЫХ СТАЛЕЙ МЕТОДОМ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ С ПОМОЩЬЮ ЛАЗЕРА

Аметов И.Э., Эбубекиров Э.Д., Муаремов М.А.

*Крымский инженерно-педагогический университет им. Ф. Якубова,
Симферополь, Россия*

Ключевые слова: конструкционная сталь, лазер, термическая обработка, плотность дислокаций, твердость, шахматное распределение.

Аннотация. Проведена обработка поверхности некоторых марок конструкционных сталей монохромным лазерным излучением методом пересекающего воздействия. Указанный процесс сопровождался определенным термическим воздействием, вследствие чего поверхностный слой претерпел образование в нем более прочной твердой фазы. Возросшая плотность дислокаций и измельчение зерен привели к значительному росту значений поверхностной твердости образцов конструкционной стали. Вместе с тем, относительно небольшое термическое воздействие исключило необходимость дальнейшей механической обработки поверхности и сохранило, как высокие показатели твердости, так и геометрию изделий для сталей данного вида.

INCREASE OF STRENGTH OF STRUCTURAL BUILDING STEELS BY LASER-ASSISTED HEAT TREATMENT

Ametov I.E., Ebubekirov E.D., Muaremov M.A.

*Crimean Engineering and Pedagogical University named after F. Yakubov,
Simferopol, Russia*

Keywords: structural steel, laser, heat treatment, dislocation density, hardness, chess distribution.

Abstract. The surface treatment of some grades of structural steels by monochrome laser radiation using the intersecting method has been carried out. The mentioned process was accompanied by a certain thermal influence, as a result of which the surface layer underwent the formation of a stronger solid phase in it. The increased dislocation density and grain refinement led to a significant increase in the surface hardness values of structural steel samples. At the same time, a relatively small thermal effect eliminated the need for further surface machining and preserved both high hardness values and geometry of products for steels of this type.

Постановка проблемы. Прочность конструкционных сталей является одним из основополагающих факторов для их эксплуатации во времени. Увеличение прочности всего материала недостижимо без легирования теми или иными элементами, что существенно меняет их стоимость, технологию производства, логистику и логику их потребления. Выбор различных путей, а именно вариативность химического состава, термическая обработка разной степени глубины или методы поверхностного упрочнения, зависит от ряда разнообразных факторов, но не меняет общую ситуацию в металлообработке в целом. Следует отметить, что почти все способы приводят к изменению размеров изделий, что подразумевает дальнейшие операции по механической

обработке образцов, которые, в свою очередь, могут снижать прочность поверхностного слоя.

На наш взгляд, упрочнение конструктивных сталей, при выполнении условий дешевизны и высокого уровня прочности, а, следовательно, и долговечности является актуальной задачей современного машиностроения. Например, современные методы решения указанных задач предполагают применение процессов термического воздействия на поверхность металлов и сплавов лазерным излучением или токами высокой частоты [1]. Более того, разумное применение указанных способов воздействия на материал должно приводить к окончательному решению задач с выполнением требуемых условий.

Анализ литературы. Явное следствие упрочнения поверхностного слоя, на которое не должно влиять внешнее воздействие на материал, это рост плотности дислокаций и уменьшение размеров зерна в кристаллической структуре металла. Данное явление описывается так называемым уравнением "Холла-Петча": $\sigma_T = \sigma_0 + k/\sqrt{d}$, где σ_0 – напряжение, минимальное значение которого необходимо для сдвига дислокации, k – коэффициент, который характеризует величину блокировки дислокаций, d – диаметр зерна [1].

Рекристаллизация в случае закалки материала увеличивает процессы торможения дислокаций вследствие возникновения внутренних сопротивлений, что получило наименование "дислокационный барьер". Образование аналогичных барьеров в определенной толщине материала способствует росту долговечности сплава, снижает процессы усталости, износа поверхности и препятствует растрескиванию поверхностного слоя изделия.

Из анализа литературных источников вытекает, что лучше всего процессы упрочнения всех комплексных механических свойств конструкционной сталей, протекают при применении именно термической обработки [2-6]. Для аналогичных низкоуглеродистых сталей режимы и подходы термической обработки отличается в деталях [6], от легированных сталей, включающих разнообразные добавки легирующих элементов [7], но в целом протекают по одному и тому же технологическому подходу. Повышение содержания углерода в среднеуглеродистых конструкционных сталях отрицательно сказывается на качестве обработанного изделия, поскольку повышенное содержание углерода и, следовательно, карбидов вместе с высоким уровнем прочности, обязательно ведет к росту процессов хрупкого разрушения. Если в сталях еще большее содержание углерода, то как единственный способ остается провести поверхностное термическое улучшение [6, 7].

Другие исследователи проводили аналогичные исследования процесса поверхностного упрочнения, но другим методом – это так называемая "ультразвуковая механическая обработка". В его основе лежит эффект "шахматного распределения", характеризуемый распределением

растягивающих и сжимающих нормальных напряжений по очереди, то на поверхностном слое материала, то в его основной толщине [8-10].

Тем не менее, следует помнить о вредном воздействии чрезмерного, как местного нагрева, так и общего перегрева образца или изделия. Кроме того, при эксплуатации конструкционных сталей необходимо учитывать тот фактор, что значительное количество строительных конструкций содержат сварные швы или сварные точки.

Хорошую свариваемость при этом показывают стали, которые содержат в своем составе небольшое количество углеродных атомов, не более 0,25% по массе. С ростом процентного содержания углерода в материале свариваемость ухудшается. Как следствие, сталь с большим содержанием углерода сваривается хуже, а процесс требует применения сварочной проволоки с низким содержанием углерода. Таким образом, зависимость является обратно пропорциональной росту количества углерода в стали.

Процессы нагревания при сварке являются вредными, поскольку уменьшают показатели местной прочности материала. Поэтому мы считаем необходимым проведение местной поверхностной термической обработки сварочного шва, стыка или наплавки лазерной установкой с применением достаточной, но не чрезмерной мощности излучения.

Подобная обработка, которая проведена после завершения сварочных работ, может не только устранять поверхностные дефекты и трещины в изделиях, но и обеспечить определенный рост механических и антикоррозионных свойств в зоне, подвергнутой упрочнению.

Целью нашей работы является достижение эффекта упрочнения поверхностного слоя конструкционных сталей различных марок. По-видимому, достижение цели возможно вследствие проведения процесса поверхностной обработки образца или требуемой части поверхности лазерным излучением определенной мощности.

Изложение основного материала. Формула производительности процесса лазерного упрочнения выглядит следующим образом: $G_{Лаз} = K_{П} V d$, где $K_{П}$ – коэффициент перекрытия; V – скорость движения луча, мм/с; d – диаметр пучка лазера, то есть ширина дорожки упрочнения, мм [1]. Проведение поверхностной лазерной термической обработки небольшой мощности не должно сколько-нибудь существенно изменять предел прочности и предел текучести стали.

С целью более равномерного протекания процесса нагрева изделия и распределения плотности дислокаций нами был выбран способ обработки поверхности перекрывающимися зонами излучения. Поскольку при наложении зон упрочнения возникает возможность частичного нагрева предыдущей зоны, что способно привести к процессам, влекущим за собой снижение прочности, то мы максимально возможно снизили мощность излучателя (около 4000 Вт/см²).

Собственно, процесс обработки поверхности был обеспечен лазерным технологическим комплексом FMark, в котором источником излучения

является иттербиевый волоконный лазер мощностью до 50 Вт. При воздействии инфракрасного лазерного излучения с длиной волны 1060 нм, при указанной выше величине плотности мощности (около 4000 Вт/см²), происходили явления частичной фазовой перегруппировки и переориентации в поверхностном слое материала вследствие шахматного распределения тепла и нормальных напряжений на сжатие и растяжение не только на поверхности, но и на небольшой глубине материала.

Нагрев был около значений температуры фазовой перекристаллизации с последующим естественным охлаждением обработанной зоны. Как известно, вследствие определенной неравномерности нагрева, упрочнение сопровождается образованием два или три слоев упрочнения вглубь кристалла сплава.

Накопление азота в поверхностном слое материала осветляет его и свидетельствует о повышении вязкости, твердости и коррозионной устойчивости сталей рассматриваемого класса, и, следовательно, о его долговечности. Обработка в два этапа не только способствует повышению твердости поверхности (табл. 1), но и более равномерному ее распределению и постепенному ее снижению по мере удаления вглубь материала.

Табл. 1. Значения твердости конструкционных сталей некоторых марок до и после лазерного упрочнения.

Марка, стали		Ст15	Ст20	Ст30	Ст40	Ст50
Твердость, НВ	до обработки	150	160	180	220	240
	первичная	252	271	292	347	375
	вторичная	296	318	338	396	418

Кроме того, в быстром процессе местного нагрева и резкого охлаждения вследствие передвижения лазерного луча происходит процесс роста плотности дислокаций. Например, в работе [3] плотность дислокаций доходила до значений ~100 на 1 см², а при повышении мощности излучения количество дислокаций на 1 см² возросло до ~1000. При росте значений количества дислокаций на порядок (то есть в 10 раз) значения твердости поверхностного слоя возрастают приблизительно в два раза (табл. 1).

Выводы. Обработка лазерным излучением конструкционных сталей различных марок приводит к повышению твердости поверхностного слоя материала. Применение метода пересекающегося воздействия способствовала как дальнейшему повышению твердости (после повторного воздействия), так и более равномерному ее распределению по поверхности образцов. Как и следовало ожидать, с ростом содержания углерода процент повышения твердости несколько снижается, поскольку наличие карбида в поверхностном слое несколько по-другому перераспределяет зоны нагрева и охлаждения. Выяснение данной зависимости станет темой дальнейших исследований на пути нахождения наиболее оптимального режима лазерной обработки сталей данного вида.

Список литературы

1. Степанова Т.Ю. Технологии поверхностного упрочнения деталей машин: учебное пособие. – Иваново: Изд-во Ивановского государственного химико-технологического университета, 2009. – 64 с.
2. ГОСТ 1050-2013.Metalloпродукция из нелегированных конструкционных качественных и специальных сталей. Общие технические условия. – М.: Стандартинформ, 2014. – 36 с.
3. Пачурин Г.В. Влияние температуры на механические свойства листовых конструкционных сталей // Фундаментальные исследования. – 2014. – № 1. – С. 18-23.
4. Пачурин Г.В., Власов В.А. Механические свойства листовых конструкционных сталей при температурах эксплуатации // Металловедение и термическая обработка металлов. – 2014. – № 4(706). – С. 48-53.
5. Пачурин Г.В., Власов В.А., Чиненков С.В. Механические свойства листовых конструкционных сталей при пониженных и повышенных температурах // Упрочняющие технологии и покрытия. – 2012. – № 4. – С. 3-8.
6. Соколов Р.А., Новиков В.Ф., Ковенский И.М., Муратов К.Р., Венедиктов А.Н., Чаугарова Л.З. Влияние термической обработки на образование соединения MNS в низкоуглеродистой конструкционной стали 09Г2С // Обработка металлов (технология, оборудование, инструменты). – 2022. – Т. 24, № 4. – С. 113-126.
7. ГОСТ 19281-73. Сталь низколегированная сортовая и фасонная. Технические условия. – Изд-е официальное. – 7 с.
8. Поверхностные слои и внутренние границы раздела в гетерогенных материалах / Под ред. В.Е. Панина. – Новосибирск: Изд-во СО РАН, 2006. – 520 с.
9. Панин В.Е., Егорушкин В.Е., Панин А.В., Моисеенко Д.Д. Природа локализации пластической деформации твердых тел // Журнал технический физики. – 2007. – Т. 77, Вып. 8. – С. 62-69.
10. Панин В.Е., Панин А.В. Эффект поверхностного слоя в деформируемом твердом теле // Физическая мезомеханика. – 2005. – Т. 8, № 5. – С. 7-15.

References

1. Stepanova T.Yu. Technology of surface hardening of machine parts: a training manual. – Ivanovo: Publ. house of Ivanovo State Chemical Engineering University, 2009. – 64 p.
2. GOST 1050-2013. Metal products of unalloyed structural quality and special steels. General specifications. – M.: Standardinform, 2014. – 36 p.
3. Pachurin G.V. Influence of temperature on the mechanical properties of sheet structural steels // Fundamental Research. 2014, no. 1, pp. 18-23.
4. Pachurin G.V., Vlasov V.A. Mechanical properties of sheet structural steels at operating temperatures // Metal Science and Heat Treatment of Metals. 2014, no. 4(706), pp. 48-53.
5. Pachurin G.V., Vlasov V.A., Chinenkov S.V. Mechanical properties of sheet structural steels at reduced and elevated temperatures // Reinforcing technologies and coatings. 2012, no. 4, pp. 3-8.
6. Sokolov R.A., Novikov V.F., Kovensky I.M., Muratov K.R., Venediktov A.N., Chaugarova L.Z. Effect of heat treatment on the formation of MNS compound in low carbon structural steel 09G2S // Metal Treatment (technology, equipment, tools). 2022, vol. 24, no. 4, pp. 113-126.

7. GOST 19281-73. Low-alloyed steel sections and shapes. Technical conditions. – Official edition. – 7 p.
8. Surface layers and internal interfaces in heterogeneous materials / Edited by V.E. Panin. – Novosibirsk: Publ. house SB RAS, 2006. – 520 p.
9. Panin V.E.; Egorushkin, V.E., Panin A.V., Moiseenko D.D. Nature of the plastic deformation localization of solid bodies // Journal of Technical Physics. 2007, vol. 77, iss. 8, pp. 62-69.
10. Panin V.E., Panin A.V. Surface layer effect in a deformable solid body (in Russian) // Physical mesomechanics. 2005, vol. 8, no. 5, pp. 7-15.

Аметов Исмаил Энверович – кандидат химических наук, доцент кафедры электромеханики и сварки	Ametov Ismail Enverovich – candidate of chemical sciences, associate professor of the Department of electromechanics and welding
Эбубекиров Эмир Диляверович – магистрант	Kakach Ruslan Serverovich – graduate student
Муаремов Мустафа Арсен оглы – магистрант	Kuku Ayder Arsenovich – graduate student
ems@kipu-rc.ru	

Received 23.04.2024