

Улучшение условий лазерного нагрева для формовки материалов с ферритно-мартенситной структурой

С.П. Мурзин^{1,2}, Г. Лидль², Р. Биелак², А.А. Мельников¹

¹Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева, Московское шоссе 34А, Самара, Россия, 443086

²Венский технический университет, Гетрайдемаркт 9, Вена, Австрия, 1060

Аннотация. Высокопрочные двухфазные ферритно-мартенситные стали с контролируемым количеством мартенсита имеют наиболее благоприятное сочетание долговечности и пластичности по сравнению с другими низколегированными сталями. Определена возможность улучшения условий лазерного нагрева для формовки листовых материалов с ферритно-мартенситной структурой. Показано, что перераспределение плотности мощности теплового источника позволяет осуществлять этот процесс без значительного локального уменьшения толщины профиля. В качестве лазерного источника использовался диффузионно-охлаждаемый высокочастотно-возбуждаемый CO₂-лазер ROFIN DC 010 с максимальной выходной мощностью 1000 Вт. Для перераспределения плотности мощности лазерного излучения использовался дифракционный оптический элемент (ДОО). В этом случае область пластической деформации характеризуется локальным утонением профиля, в то время как микротрещины и разрыв металла не наблюдались.

1. Введение

Вследствие чрезвычайно локализованного концентрированного подвода энергии сфокусированного лазерного излучения, лазерная обработка материалов обеспечивает более высокую плотность энергии, чем практически любой другой тепловой источник для обработки деталей. Таким образом, лазерная обработка материалов может быть использована не только для лазерной сварки или резки, но и для модификации физических и механических свойств материалов. В многочисленных статьях, монографиях и справочниках [1-5] показано, что такие важные характеристики металлических материалов, как прочность на разрыв, усталостная прочность и износостойкость, являются структурно-чувствительными, т.е. могут управляться надлежащими изменениями структур материалов путем лазерной обработки. Однако если учитывать вопросы, связанные с селективной лазерной модификацией металлических материалов, большая часть работ до сих пор была посвящена закалке с использованием либо тепловой энергии, либо деформации. При улучшении структурного состояния материала путем отжига можно реализовать значительное улучшение пластического течения металла и локализацию деформации [6-8].

Двухфазные (ДФ) стали представляют собой стали с ферритной структурой основы, в которой мартенситная фаза имеет островную структуру. Они характеризуются высокой прочностью на растяжение из-за относительно твердой мартенситной фазы и низкой начальной точкой текучести из-за относительно мягкой ферритной фазы [9]. Благодаря хорошей комбинации

прочности и формруемости, ДФ стали обладают потенциалом для повышения эффективности дорожно-транспортного происшествия без увеличения массы кузова автомобиля и сравнительно недавно используются в новых транспортных средствах. Тем не менее, применение ДФ сталей во многих частях кузова и других конструкций по-прежнему ограничено, так как необходимо исследовать многие проблемы, связанные с производственной формовкостью, способностью создания соединений и долговечностью [10-11]. Локальный лазерный отжиг областей пластической деформации обеспечивает увеличение предельного удлинения и уменьшение минимального радиуса изгиба. Эти подходы целесообразно также использовать для локальной модификации ДФ сталей [12-14]. Целью данного исследования является определение возможности улучшения условий лазерного нагрева для формовки листовых материалов с ферритно-мартенситной структурой.

2. Результаты и обсуждение

В работах [13, 14] выявлены условия лазерного нагрева для теплой формовки материалов с ферритно-мартенситной структурой. Изучен процесс формовки с лазерным нагревом образцов из стали DP 1000 толщиной 1,5 мм. Использовался волоконный лазер с максимальной выходной мощностью 1500 Вт. Лазерный луч был преобразован с помощью плосковыпуклой линзы и аксикона в эллиптическое кольцо, которое проецировалось на поверхность под углом 45°.

Исследование микроструктуры образцов проводилось с использованием растрового электронного микроскопа (РЭМ) TESCAN Vega SB. Было обнаружено волокнистое строение металла, образующееся при формовке профиля. Было определено, что утонение в области пластической деформации распределено неравномерно. На рисунке 1 показана зона максимального утонения. Минимальная толщина материала составляла 0,8 мм. Утонение наблюдалось также вне этой зоны, но деформация здесь не такая интенсивная. Наряду со значительной разницей в толщине существует вероятность разрушения внутреннего поверхностного слоя материала с образованием микротрещин (рисунок 2) и/или поверхностных разрывов.

Деформация приводит к изменению формы зерен, которые получают форму, вытянутую в направлении деформации или наиболее интенсивного течения металла, которое, разумеется, в большей степени выражено для сталей с высоким содержанием феррита. За счет увеличения плотности дислокаций, образования ячеистой субструктуры в ферритной компоненте достигается упрочнение стали. Во время пластической деформации происходит дробление и измельчение зерен. Наличие мелкозернистой структуры может привести к ускорению кинетики рекристаллизации и аустенизации при термообработке. Вследствие дробления и растяжения зерен в процессе деформации общая поверхность границ увеличивается, блоки внутри фрагментов уменьшаются.

Под действием деформации твердые растворы распадаются. Продукты этого распада также обуславливают упрочнение. К уменьшению пластичности материала приводит сильное препятствование скольжению различными дефектами. Наряду с этим происходит постепенное накопление таких дефектов, которые приводят к разрушению.

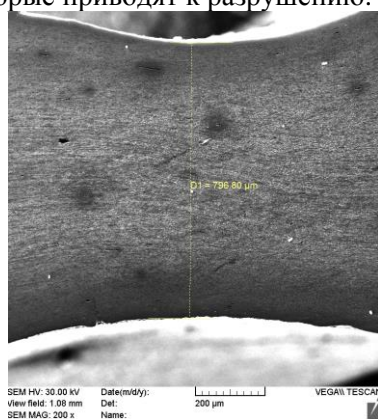


Рисунок 1. Зона максимального утонения в области пластической деформации после формовки материалов с ферритно-мартенситной структурой.

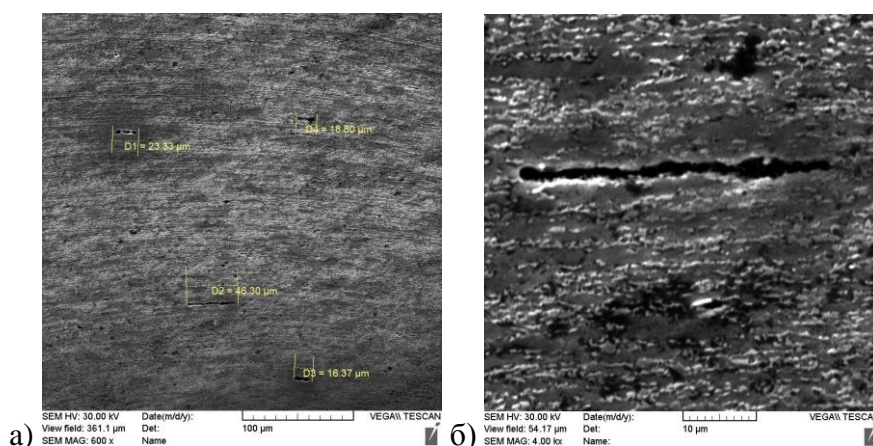


Рисунок 2. Образование микротрещин в области пластической деформации, увеличение: 600х (а), 4000х (б).

Определена возможность улучшения условий лазерного нагрева для формовки листовых материалов с ферритно-мартенситной структурой. Поскольку формовка - это процесс, который происходит только за счет утонения материала, желательно уменьшить локальное утонение на большой площади обработки, включая, в частности, центральную область. Таким приемом можно добиться уменьшения максимального утонения. Перераспределение плотности мощности теплового источника позволяет осуществить этот процесс без значительного локального утонения профиля. В качестве лазерного источника использовался диффузионно-охлаждаемый высокочастотно-возбуждаемый CO_2 -лазер ROFIN DC 010 с максимальной выходной мощностью 1000 Вт. Для перераспределения плотности мощности лазера использовался дифракционный оптический элемент (ДОЭ).

Было установлено, что целесообразно выполнить равномерный нагрев зоны обработки до температуры, близкой к критической точке, при минимальной длительности нагрева и выдержки при максимальной температуре, чтобы предотвратить размягчение. Температура в зоне отжига не превышала, но приближалась к температуре, при которой при нагревании начинает формироваться аустенит (точка фазового перехода A_{C1}). Вследствие образования феррита и отпущенного мартенсита в этой зоне произошло размягчение материала. При этом количество отпущенного мартенсита зависит от температуры и времени воздействия. На рисунке 3 показана зона максимального утонения металлического материала после такой обработки и формовки образца из стали DP 1000 толщиной 1,5 мм. Минимальная толщина материала, имеющая место после формовки, составляла 1,08 мм. На рисунке 4 показано изображение микроструктуры материала, полученное с помощью РЭМ. Черная матрица - феррит, а серые части - мартенсит. В стали DP1000 острова мартенсита диспергированы в ферритной матрице, что приводит к большей прочности при достаточной пластичности и вязкости. Известно, что на первой стадии деформируется феррит, затем происходит совместная деформация феррита и мартенсита, а на заключительной стадии возможна деформация мартенсита. Микроструктура представляет собой чередующиеся слои феррита и мартенсита, вытянутые в направлении основной деформации. Вследствие зарождения и роста аустенита, а также дальнейшего образования мартенсита на границах зерен при охлаждении, зерна феррита имеют вырожденную морфологию.

Как правило, двухфазные стали определяются как состоящие из ферритной матрицы с наличием дисперсных островков мартенсита. Но из-за большой доли мартенсита в стали DP1000 мартенсит, охватывая почти весь феррит, образует смежную микроструктуру, которая лучше описывается не как островная микроструктура, а как микроструктура, похожая на сеть [15]. Между зернами наблюдались сульфидные включения разных размеров, удлиненные в направлении деформации. Область пластической деформации характеризуется локальным уменьшением профиля толщины, в то время как микротрещины и разрыв металла не наблюдались.

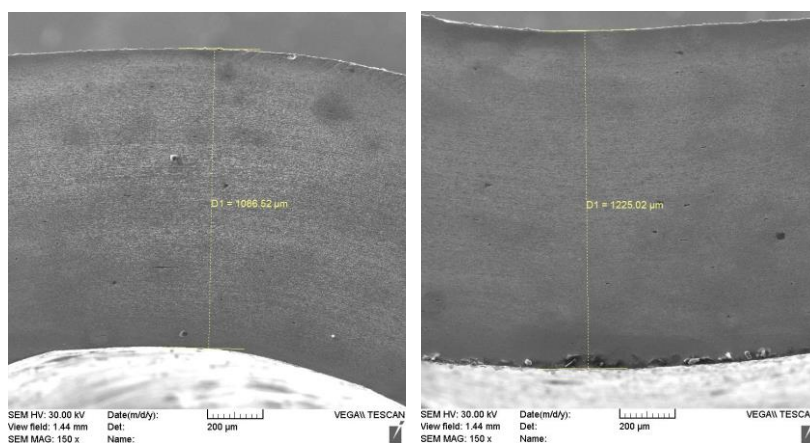


Рисунок 3. РЭМ-изображения зоны максимального утонения металлического материала после лазерной обработки с ДОО и формовки образца из стали DP 1000.

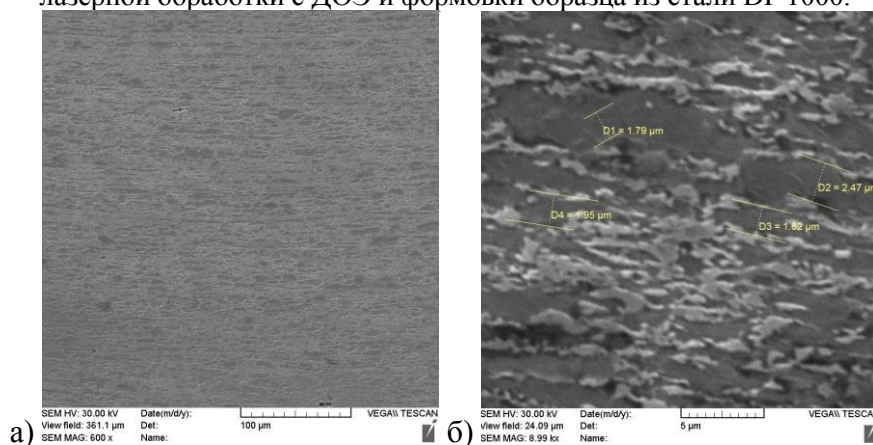


Рисунок 4. РЭМ-изображения микроструктуры, увеличение: 600х (а), 9000х (б).

Особенности поведения двухфазных сталей как композиционных материалов определяются разностью прочностных характеристик мартенсита и феррита, которые могут быть уменьшены в процессе лазерного отжига [16]. Необходимо уменьшить плотность дислокаций в феррите и выполнить вторую стадию размягчения в зоне термического воздействия, при которой происходит уменьшение мартенситной фракции и появление бейнитовых и мартенситно-аустенитных компонентов [15, 17]. Некоторое количество остаточного аустенита также остаются в микроструктуре. По сравнению с полностью закаленными сталями особенности отжига двухфазных сталей обусловлены не только наличием феррита, перенасыщенного межузельными атомами, но и остаточными напряжениями в результате локального мартенситного превращения аустенита, повышенной плотности дислокаций в ферритовых зонах вблизи мартенсита границы, небольшими размерами остаточного аустенита, а также неоднородностью выделений специальных карбидов в объеме закаленной стали. Следует отметить, что двухфазные ферритно-мартенситные стали, которые являются материалами для изготовления деталей холодной обработкой или методами пластической деформации ниже температуры рекристаллизации металлов, не проявляют тенденции к старению при длительном хранении при температурах вблизи комнатной температуры. При этом упрочнение деталей из двухфазных сталей дает возможность повысить их рабочие характеристики, что в некоторых случаях является необходимым. При определении условий рациональной термообработки из двухфазной области при лазерном нагреве следует учитывать факторы, влияющие на кинетику аустенизации, а также предпочтительные участки зарождения аустенита и его морфологию. Этими факторами являются исходная структура, состав стали, количество и размер дисперсных частиц и т.д. В то же время, выбор конкретных режимов лазерной обработки должен

обеспечивать не только получение заданной структуры, но и ее минимальную чувствительность к неизбежным колебаниям параметров процесса.

3. Заключение

Изучен процесс формовки образцов из стали DP 1000 толщиной 1,5 мм с применением лазерного нагрева. После лазерного нагрева и формовки образцы имели волокнистую структуру металла. Было определено, что утонение в зоне пластической деформации распределено неравномерно. Минимальная толщина материала составляла 0,8 мм. Кроме того, утонение наблюдалось за пределами этой зоны, но деформация здесь не была такой интенсивной. Наряду с возникновением значительной разницы толщин существовала вероятность разрушения внутреннего поверхностного слоя материала с образованием микротрещин и/или поверхностных разрывов.

Определена возможность улучшения условий лазерного нагрева для формовки листовых материалов с ферритно-мартенситной структурой. Показано, что перераспределение плотности мощности теплового источника позволяет осуществлять этот процесс без значительного локального уменьшения толщины профиля. Чтобы избежать нежелательных изменений формы, целесообразно использовать ДОО, которые перераспределяют плотность мощности лазерного излучения. В качестве лазерного источника для дальнейших исследований использовался диффузионно-охлаждаемый высокочастотно-возбуждаемый CO₂-лазер ROFIN DC 010 с максимальной выходной мощностью 1000 Вт. Изучение микроструктуры позволило выявить волокнистую структуру металла, образующуюся при изготовлении деталей формовкой. Область пластической деформации характеризуется локальным утонением профиля, в то время как микротрещины и разрыв металла не наблюдались.

4. Литература

- [1] Steen, W.M. Laser material processing / W.M. Steen, J. Mazumder. – London. UK: Springer, 2010. – 558 p.
- [2] Laser processing of materials: fundamentals, applications and developments / edited by P. Schaaf. – Berlin Heidelberg: Springer-Verlag, 2010. – 241 p.
- [3] Kannatey-Asibu, E.Jr. Principles of laser materials processing / E.Jr. Kannatey-Asibu. – Hoboken, New Jersey. US: John Wiley & Sons, 2009. – 819 p.
- [4] Dahotre, N.B. Laser fabrication and machining of materials / N.B. Dahotre, S.P. Harimkar. – New York. US: Springer Science + Business Media, 2008. – 558 p.
- [5] Ion, J.C. Laser processing of engineering materials: principles, procedure and industrial application / J.C. Ion. – Amsterdam/Oxford. Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2005. – 576 p.
- [6] Bergmann, H.W. Short Term Annealing by Laser Treatment / H.W. Bergmann. – Proc. SPIE. High Power Lasers: Sources, Laser-Material Interactions, High Excitations, and Fast Dynamics. – 1987. – Vol. 0801. – P. 296-301.
- [7] Method for Laser Annealing: US Patent 7063755: Class. C22F1/04 / Nolan S.R.; pub. 20.06.06.
- [8] Murzin, S.P. Local laser annealing for aluminium alloy parts / S.P. Murzin // Laser. Eng. – 2016. – Vol. 33(1-3). – P. 67-76.
- [9] Wu-Rong, W. The limit drawing ratio and formability prediction of advanced high strength dual-phase steels / W. Wu-Rong, H. Chang-wei, Z. Zhong-hua, W. Xi-cheng // Materials and Design. – 2011. – Vol. 32(6). – P. 3320-3327.
- [10] Huang, T.T. Strain-hardening behaviors of dual phase steels with microstructure features / T.T. Huang, R.B. Gou, W.J. Dan, W.G. Zhang // Mat. Sci. Eng. A-Struct. – 2016. – Vol. 672. – P. 88-97.
- [11] Farabi, N. Microstructure and mechanical properties of laser welded dissimilar DP600/DP980 dual-phase steel joints / N. Farabi, D.L. Chen, Y. Zhou // J. Alloys Compd. – 2011. – Vol. 509(3). – P. 982-989.
- [12] Romero, P. Laser assisted conical spin forming of dual phase automotive steel. experimental demonstration of work hardening reduction and forming limit extension / P. Romero, N. Otero, J. Cabrera, D. Masague // Phys. Procedia. – 2010. – Vol. 5. – P. 215-225.

- [13] Bielak, R. Simulation of forming processes with local heating of dual phase steels with use of laser beam shaping systems / R. Bielak, F. Bammer, A. Otto, C. Stiglbrunner, C. Colasse, S.P. Murzin // *Computer Optics*. – 2016. – Vol. 40(5). – P. 659-667. DOI: 10.18287/2412-6179-2016-40-5-659-667.
- [14] Murzin, S.P. Laser beam shaping for modification of materials with ferritic-martensitic structure / S.P. Murzin, N.L. Kazanskiy, G. Liedl, A. Otto, R. Bielak // *Procedia Engineering*. – 2017. – Vol. 201. – P. 164-168.
- [15] Murzin, S.P. Softening of low-alloyed titanium billets with laser annealing / S.P. Murzin, N.L. Kazanskiy // *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. – 2018. – Vol. 302(1). – P. 012070.
- [16] Alves, P.H.O.M. Laser beam welding of dual-phase DP1000 steel / P.H.O.M. Alves, M.S.F. Lima, D. Raabe, H.R.Z. Sandim // *J. Mater. Process. Tech.* – 2018. – Vol. 252. – P. 498-510.
- [17] Wang, J. Effect of energy input on the microstructure and properties of butt joints in DP1000 steel laser welding / J. Wang, L. Yang, M. Sun, T. Liu, H. Li // *Materials and Design*. – 2016. – Vol. 90. – P. 642-649.

Благодарности

Исследование поддержано Российским фондом фундаментальных исследований, проект 18-58-14001. Австрийский научный фонд (FWF): номер проекта I 3920.

Conditions improving of laser heating for forming of materials with a ferritic-martensitic structure

S.P. Murzin^{1,2}, G. Liedl², R. Bielak², Melnikov¹

¹Samara National Research University, Moskovskoe Shosse 34A, Samara, Russia, 443086

²Vienna University of Technology, Getreidemarkt 9, Vienna, Austria, 1060

Abstract. High-strength dual phase ferritic-martensitic steels with a controlled amount of martensite have the most favorable combination of durability and plasticity compared to other low-alloy steels. The possibility of conditions improving of laser heating for forming sheet materials with a ferritic-martensitic structure has been determined. It is shown that the redistribution of the power density of the heat source allows this process to be performed without a significant local decrease in the profile thickness. A diffusion-cooled and high-frequency excited CO₂ laser ROFIN DC 010 with a maximum output power of 1000 W was used as the laser source. To redistribute the laser power density, a diffractive optical element (DOE) was used. In this case the region of plastic deformation is characterized by a local decrease the thickness profile, while microcracks and a discontinuity of the metal weren't observed.