

УДК 629.113.011

А.П. Фалалеев*Севастопольский национальный технический университет**ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: a_falaleev@mail.ru***ВЛИЯНИЕ РЕМОНТНЫХ НАГРЕВОВ
НА СВОЙСТВА АВТОМОБИЛЬНОЙ ДВУХФАЗНОЙ СТАЛИ**

Экспериментально исследовано влияние температуры (с выдержкой при нагреве) во время кузовного ремонта на твердость деталей из двухфазной стали. Найдены коэффициенты эмпирической регрессионной зависимости твердости от технологических режимов ремонта. Показано, что для двухфазной стали DP980 наблюдается значительное разупрочнение при нагреве до температур близких к критическим точкам фазового перехода. Степень разупрочнения зависит от длительности выдержки при пиковой температуре. Обнаружено, что причинами потери твердости является уменьшение объема мартенситной фазы в перегретых областях.

Ключевые слова: *двухфазная сталь, кузовной ремонт, твердость, технологический отпуск, зона термической деградации.*

Введение

При производстве кузовов современных автомобилей последние несколько лет активно используются двухфазные стали. Это позволило снизить вес кузовов более чем на 30% и одновременно значительно повысить пассивную безопасность. Большая популярность двухфазных сталей при производстве несущих деталей кузовов обусловлена их высокой степенью упрочнения при деформации, что позволяет изготавливать высокопрочные детали методом обычной холодной штамповки. Высокая упрочняемость двухфазных сталей связана с их ферритно-мартенситной структурой, которая формируется в процессе закалки малоуглеродистых сталей в диапазоне температур AC_1 и AC_3 с охлаждением в воде, благодаря не полной трансформации аустенита.

При необходимости кузовного ремонта современных автомобилей возникает необходимость в обеспечении свойств восстанавливаемых деталей. Во время ремонтных операций сварки или вытяжки на «горячую» металл кузова испытывает нагрев до температур, сравнимых с температурами фазовых переходов.

Анализ существующих температурных режимов при ремонтных работах

Несмотря на большое количество работ, посвященных исследованию влиянию термической обработки на поведение низкоуглеродистых сталей, недостаточно внимания уделено возможности использования сварки в кузовном ремонте двухфазных сталей и влиянию режимов технологических операций на поведение восстановленных деталей. В работах [1, 2] исследуются фазовые переходы во время нагрева двухфазной стали, ее механические свойства и фазовый состав в зависимости от режимов отпуска. Исследованию влияния лазерной сварки на фазовый состав зоны шва посвящены работы [3–5]. Отмечается большое значение объема мартенситной фазы на механические свойства двухфазных сталей. Работы [5, 6] исследуют поведение двухфазных сталей при локальном лазерном нагреве при штамповке. Неисследованным остается вопрос возможности применения сварки в ремонтном производстве и определения режимов использования, а так же моделирования свойств кузова после ремонта.

Разупрочнение двухфазных сталей во время технологических операций, таких как сварка, связано с отпуском мартенсита. Теоретически отпуск мартенсита в мартенситных сталях объясняется нагревом до температур, близких к критическим температурам фазовых превращений AC_1 . Степень разупрочнения зависит от диффузии углерода, которая в свою очередь зависит от температуры нагрева и времени выдержки. В зависимости от них отпуск можно разбить на изотермический и неизотермический. Изотермический отпуск включает медленный нагрев, долгую выдержку при наибольшей температуре и медленное охлаждение и применяется обычно для улучшения ударной вязкости мартенситных сталей [4]. Изотермический происходит при выполнении технологических операций, подразумевающих быстрый нагрев, незначительное время выдержки и быстрое охлаждение. Отпуск мартенсита исследован достаточно широко, но в основном для полностью мартенситных сталей.

Для определения влияния технологических нагревов на физические свойства двухфазных сталей были исследованы: неизотермические нагревы, не сопровождающиеся выдержкой, обычно присущие сварочным операциям; изотермические нагревы, с длительной выдержкой при пиковой температуре, соответствующие вытяжке металла «на горячую».

Графики нагрева-охлаждения, соответствующие различным видам технологических операций, изображены на рисунке 1.

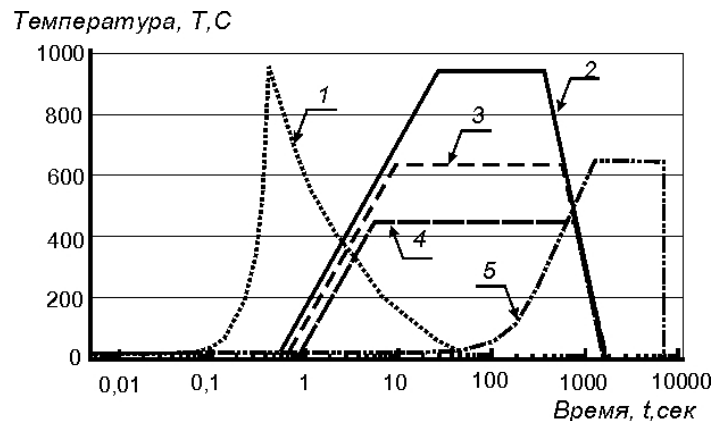


Рисунок 1 – Графики нагрева при ремонтных операциях: 1 – контактная точечная сварка; 2 – дуговая полуавтоматическая сварка в среде защитного газа; 3 – высокотемпературная пайка (CuSi3) в среде защитного газа; 4 – высокотемпературная пайка с легкоплавким припоем в среде защитного газа; 5 – изотермический нагрев при ремонтной вытяжке с нагревом

Контактная сварка (график 1, рисунок 1) обеспечивает самую высокую скорость нагрева, до 5000°C/с. Неизотермический нагрев и охлаждение при контактной сварке не позволяет осуществить медленные равновесные переходы фазового состояния. Полуавтоматическая дуговая сварка в среде углекислого газа (график 2, рисунок 1) является наиболее распространенным методом соединения деталей в ремонтном производстве. Температура в дуге достигает 3000 °C. Высокотемпературная пайка (графики 3, 4, рисунок 1) не приводит к расплаву соединяемых деталей, хотя демонстрирует прочность соединений конкурирующих с прочностью базового металла. Она рекомендуется рядом производителей автомобилей для ремонта деталей из закаленных сталей (двухфазных, мартенситных) и сталей с гальваническим цинковым покрытием. Температура нагрева зависит от марки припоя. Наибольшее распространение получил медно-кремниевый припой CuSi3. Для графиков 2, 3, 4, (рисунок 1) длительность циклов температурного воздействия при наложении сварочных швов будет зависеть от толщины свариваемого металла, размеров свариваемых деталей, длины шва, режимов и свойств материала. При типовых ремонтных швах время нагрева достигает 80 с, время выдержки при пиковой температуре от 5 с до 90 с, в зависимости от типа шва и конфигурации деталей.

Цель исследования – оценка влияния температуры на прочностные параметры стали.

Методика исследования

Для исследования влияния термического воздействия на свойства двухфазной стали измерялась твердость образцов после остывания при изотермическом и неизотермическом нагревах с разной выдержкой. При изотермическом воздействии детали сваривались контактной сваркой, с последующим охлаждением на воздухе. Контактная сварка демонстрировала самую высокую скорость нагрева. При нагреве фиксировалась максимальная температура точек детали, а после охлаждения на воздухе измерялась твердость образцов на разном расстоянии от центра сварки.

При изотермическом нагреве образцы нагревались и выдерживались в муфельной печи 5 мин. и 20 мин., затем охлаждались на воздухе. После охлаждения измерялась твердость образцов.

Для испытаний использовались образцы двухфазной стали DP980 производителя Тата-стил: толщиной 1,2 мм с гальваническим покрытием, с известным химическим составом (C – 0,15; Mn – 1,50; Si – 0,31; Al – 0,05; Mo – 0,006; Cr – 0,02; Cu – 0,02; S – 0,006; P – 0,01). Температуры, соответствующие критическим точкам фазовых переходов, были рассчитаны в соответствии с химическим составом и составили AC_3 – 862 °C, AC_1 – 724 °C.

Распределение твердости металла исследовалось твердомером Инстрон-Волперт (Instron-Wolpert) по Виккерсу под нагрузкой 30 Н и продолжительностью 15 с. Все значения твердости представляют собой среднее значение по результатам трех идентичных измерений. Точечная контактная сварка осуществлялась машиной TDN-63 с электродом диаметром 6 мм в образцах размером 25 мм×25 мм. Сила прижатия электродов, ток и время импульса: 3920 Н, 8,5 кА, 20 циклов (каждый цикл длительностью 0,02 с) соответственно. Мониторинг температуры проводился с помощью бесконтактного инфракрасного пирометра.



Рисунок 2 – Образец DP 980, сваренный контактной сваркой

Для оптической микроскопии все образцы шлифовались, полировались и травились 2 % раствором Нитала, затем для выделения мартенситной фазы травились в пиросульфиде натрия ($\text{Na}_2\text{S}_2\text{O}_5$).

Оценка результатов экспериментов

Для оценки влияния температуры неізотермического технологического нагрева на прочностные параметры двухфазной стали результаты измерения твердости в окрестности точки сварки представлены совместно с графиком распределения пиковой температуры (рисунок 3).

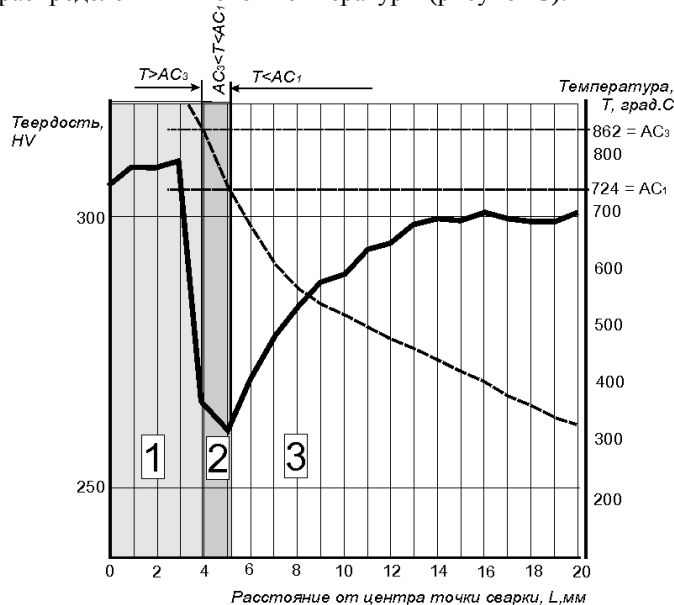


Рисунок 3 – Распределение твердости и пиковых температур в окрестности точек контактной сварки стали DP980

В зависимости от достигнутой пиковой температуры в окрестности точки сварки, можно выделить три зоны, характеризующих поведение металла. В зоне 1 (рисунок 3) температура превысила точку плавления. Твердость в этой зоне превышает твердость базового металла, что связано, скорее всего с активным формированием мартенсита из-за быстрого охлаждения расплавленного металла. Зона 2 (рисунок 3) была нагрета до температур в диапазоне критических точек фазового перехода, между точками AC_1 и AC_3 .

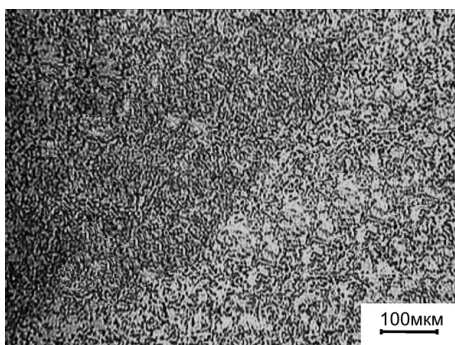


Рисунок 4 – Микроструктура участка перехода из зоны 1 в зону 2

Уникальные свойства двухфазной стали определяются ее микроструктурой (рисунок 4). Зерна мартенсита с высокой твердостью (темные участки) распределены в ферритной матрице (светлые участки). На рисунке 4 изображена микроструктура стали при переходе из зоны 1 в зону 2, где происходит значительное изменение твердости стали.

В соответствии со значениями максимальных температур и полученными микроструктурными характеристиками, металл, примыкающий к точке сварки можно разбить на три части: зоны полного отжига (1, рисунок 3), зона неполного отжига (2, рисунок 3) и зону отпуска (3, рисунок 3).

При полном отжиге температура во время сварки превышает точку AC_3 , в результате чего происходит полный аустенитный переход. Последующее охлаждение формирует бейнитную и мартенситную структуры. В зоне 1 (левый верхний участок, рисунок 4) наблюдается преобладание мартенсита (темные участки) с включениями феррита (светлые участки). Исходя из изображения, можно вычислить объем мартенситной фазы в зоне 1 – 65 %.

Температура в зоне неполного отжига достигала значений в диапазоне $AC_1 - AC_3$. В этом диапазоне возможна только частичная трансформация аустенита. Микроструктура этой зоны будет содержать мартенсит, который сформировался из аустенита и нетрансформировавшегося феррита. В зависимости от распределения температуры нагрева материала наблюдается плавный переход из одной зоны в другую с постепенным уменьшением содержания мартенситной фазы до 38 %, увеличением размера ферритных зерен и уменьшением твердости материала (правый нижний участок, рисунок 4).

Температура в зоне отпуска не превышала значение точки фазового перехода AC_1 , но приближалась к ней. Разупрочнение материала в этой зоне происходит за счет формирования феррита и отпущенного мартенсита. Объем отпущенного мартенсита зависит от температуры и времени выдержки.

Результаты, полученные при испытаниях, не противоречат данным, приводимым в работах других исследователей [5, 6], несмотря на различия в параметрах сварки и в химическом составе сталей.

Моделирование эволюции твердости двухфазной стали

С учетом того, что основные технологические режимы нагрева при ремонте автомобильных сталей лежат в области температур до точки AC_1 , особый интерес представляет моделирование эволюции твердости в зоне 3 (рисунок 3). Экспериментальные значения твердости в указанном диапазоне при различном времени отпуска представлены в виде графиков зависимости от максимальной температуры нагрева (рисунок 5).

С помощью метода наименьших квадратов найдены функции для описания зависимостей твердости от температуры (в виде степенной регрессии). Коэффициенты регрессии продемонстрировали выраженную зависимость от времени выдержки, что позволило представить обобщенную функцию эволюции твердости от режимов технологического нагрева в виде

$$HV = HV_0 - A \left(\frac{T}{T_{AC_1}} + B + C \cdot t \right)^N, \quad (1)$$

где HV_0 – твердость базового металла в единицах твердости по Виккерсу; T_{AC_1} – первая критическая температура фазового перехода (точка AC_1 диаграммы состояния железо-углерод); t – время выдержки при максимальной температуре, секунды; A, B, C, N – постоянные, определяемые экспериментально.

Учитывая полученные значения модели для исследуемой стали DP 980, уравнение (1) можно записать так

$$HV = 300 - 0,176 \left(\frac{T}{724} + 0,972 + 3,8 \cdot 10^{-5} \cdot t \right)^{8,2}, \quad (2)$$

График (рисунок 6) демонстрирует поведение функции твердости двухфазной стали в исследуемом диапазоне температур и выдержки.

Погрешность экспериментальных данных не превышает 7%. Наличие линейной зависимости между твердостью и пределом прочности стали позволяет использовать уравнение (2) как при

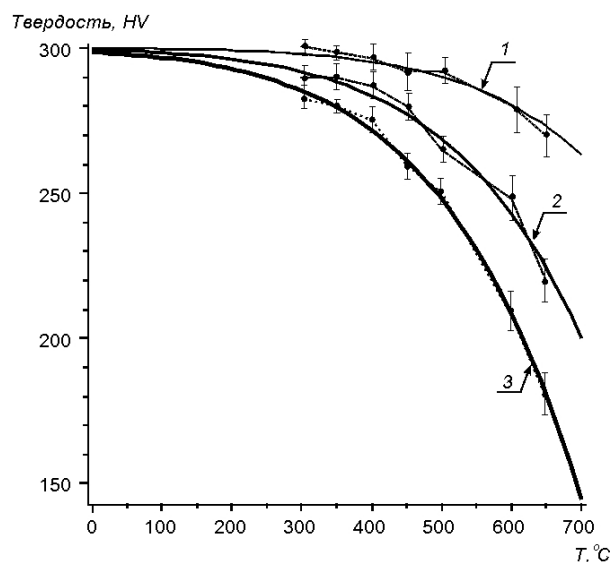


Рисунок 5 – Экспериментальные зависимости и результат моделирования твердости двухфазной стали от температуры и длительности технологического нагрева: 1 – неизо термический нагрев в результате контактной сварки с измерением твердости на разном расстоянии от точки сварки, 2 – нагрев в печи с выдержкой при максимальной температуре 5 мин., 3 – изотермический с выдержкой при максимальной температуре 20 мин.

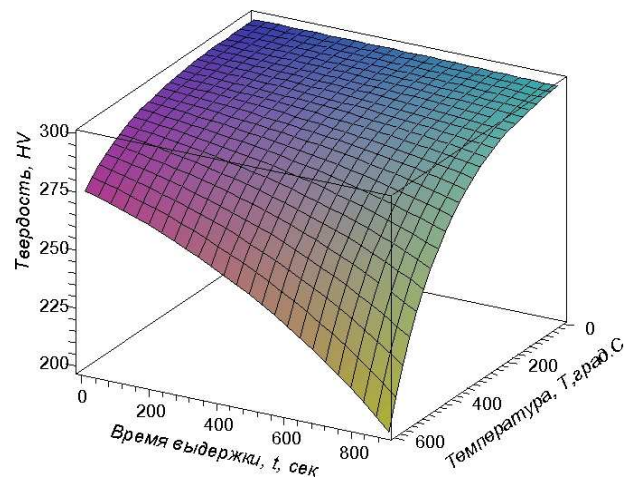


Рисунок 6 – Зависимость твердости от температуры нагрева и длительности выдержки

количественном анализе и выборе режимов ремонта, так и для качественной оценки влияния технологических нагревов на дальнейшее поведение кузова автомобиля.

Выводы

Операции автомобильного ремонта, связанные с необходимостью осуществления нагрева (такие, как сварка или вытяжка на «горячую»), могут значительно ослабить детали кузова, выполненные из двухфазных сталей. Это связано с исчезновением или отпуском мартенсита в нагретой зоне. Уменьшение твердости тем сильнее, чем ближе температура к критической температуре фазового перехода и чем больше выдержка при пиковой температуре. Исследуемая двухфазная сталь DP980 при выдержке 20 мин в зоне фазового перехода продемонстрировала падение твердости почти на половину от значений базового металла.

Исследования подтверждают необходимость контроля температуры во время выполнения ремонтных операций. Получена функциональная зависимость твердости двухфазной стали от технологических режимов при ремонте, которая позволяет одновременно учитывать значение пиковой температуры нагрева и времени выдержки. Зависимость позволяет планировать операции ремонта, рассчитывать длительность и режимы термического воздействия, выбирать рациональную длину сварного шва, с учетом сохранения прочности несущих конструктивных элементов кузова автомобиля.

Для использования полученной зависимости при расчете прочности конструктивных элементов необходимо дополнительные исследования эволюции прочностных характеристик двухфазных сталей и их связь с твердостью. Особое внимание заслуживает зависимость предела пластичности двухфазных сталей и твердости. При этом твердость может являться одним из основных критериев для выбора технологии ремонта и оценки качества проведения ремонтных кузовных операций.

Библиографический список использованной литературы

1. Failure Study on Laser Welds of Dual Phase Steel in Formability Testing / M.S. Xia, M.L. Kuntz, Z.L. Tian, Y. Zhou // Science and Technology of Welding and Joining. — 2008. — № 13. — P. 378–387.
2. Byun T.S. Tensile Properties and Inhomogeneous Deformation of Ferrite-Martensite Dual-Phase Steels / T.S. Byun, I.S. Kim // Journal of Materials Science. — 1993. — № 28. — P. 2923–2932.
3. Bag A. Influence of Martensite Content and Morphology on Tensile and Impact Properties of High-Martensite Dual-Phase Steels/ A. Bag, K.K. Ray, E.S. Dwarakadasa // Metallurgical and Materials Transactions A, 30. — 1999. — № 30. — P. 1193–1202.
4. Erdogan M. The Effect of New Ferrite Content on the Tensile Fracture Behaviour of Dual Phase Steels / M. Erdogan // Journal of Materials Science. — 2002. — № 37. — P. 3623–3630.
5. Li Y. Effect of morphology of martensite–austenite phase on fracture of weld heat affected zone in vanadium and niobium microalloyed steels/ Y. Li, T.N. Baker // Journal of materials science and technology. — 2010. — № 26. — P. 1029–1040.
6. Miles M.P. Comparison of Formability of Friction Stir Welded and Laser Welded Dual Phase 590 Steel Sheets/ M.P. Miles, J. Pew, T.W. Nelson, M. Li // Science and Technology of Welding and Joining. — 2006. — № 11. — P. 384–388.

Поступила в редакцию 29.03.2012 г.

Фалалеев А.П. Вплив ремонтних нагрівів на властивості автомобільної двофазної сталі

Експериментально досліджено вплив температури нагріву та тривалості витримки під час кузовного ремонту на твердість деталей з двофазної сталі. Знайдено коефіцієнти емпіричної еволюційної залежності твердості від технологічних режимів ремонту. Показано, що для двофазної сталі DP980 спостерігається значне зменшення міцності у зв'язку з нагрівом до критичних температур фазового переходу. Ступінь зменшення твердості залежить від тривалості витримки з піковою температурою. З'ясовано, що причинами зменшення твердості є зменшення об'єму мартенситної фази у перегрітих областях.

Ключові слова: двофазна сталь, кузовний ремонт, твердість, технологічний відпуск, зона термічної деградації.

Falaleev A.P. Repair heating effect on the mechanical properties of dual phase automotive steel

Heating effect during the car body repair procedure focused to the hardness of parts produced from the dual phase steel was investigated. Coefficients of empirical evolution function of hardness depending on the technological regimes of repair were found. It is shown that the hardness of dual phase steel DP980 is considerably reduced when it is heating close to the intercritical temperature. The level of reduction depends on the time of peak temperature holding. The reason of hardness dropping is the lower volume of martensite in the heat affected zones.

Keywords: dual phase steel, car body repair, hardness, technological tempering, heat affected zone.