

УДК 629.3.023

А.П. Фалалеев, доцент, канд. техн. наук*Севастопольский национальный технический университет**ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053**E-mail: a_falaleev@mail.ru***ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ТЕХНОЛОГИИ СОЕДИНЕНИЯ ЗАКАЛЕННЫХ КУЗОВНЫХ СТАЛЕЙ НА ИХ ЭКСПЛУАТАЦИОННЫЕ СВОЙСТВА**

Исследована прочность сварных и паяных соединений двухфазных и мартенситных автомобильных сталей. Исследованы зоны ослабления сварных конструкций из термообработанных сталей для условий кузовного ремонта. Экспериментально определено влияние соединительных операций на эксплуатационные свойства кузовных сталей.

Ключевые слова: *двухфазная сталь, мартенситная сталь, дуговая сварка, высокотемпературная пайка.*

В конструкции современных кузовов легковых автомобилей наряду с обычными низколегированными сталями используются двухфазные стали и мартенситные закаленные стали. Особенностью современных сталей является наличие ферритно-мартенситной структуры, которая формируется в результате термообработки. За счет неполного отпуска из зоны критических температур в двухфазных сталях формируется ферритная структура с мартенситными включениями. Такая композиция демонстрирует уникальные свойства с низким пределом пластичности, высокой степенью упрочнения при деформации и высокой прочностью. Это позволяет изготавливать особо высокопрочные кузовные детали методом холодной штамповки. Сверхвысокопрочные детали изготавливаются из мартенситных полностью закаленных сталей, легированных бором методом горячей штамповки. Технологическим недостатком подобных сталей можно считать наличие термообработки, которая является причиной чувствительности сталей к нагревам различного рода. Необходимость использования при производстве и ремонте сварочных операций приводит к падению прочности. При массовом производстве существует возможность применения лазерной и контактной сварки, которые значительно уменьшают зону нагрева. Механизмы формирования соединения однородных двухфазных сталей в условиях контактной сварки рассмотрены в работе [1]. Авторы отмечают, что для стали DP780 не наблюдается значительного разупрочнения из-за высоких скоростей нагрева и охлаждения, свойственных контактному нагреву. Исследованию лазерных соединений двухфазных стальных полос разной толщины посвящена работа [2], где авторы отмечают, что при сварке в автоматическом режиме удается достигать минимальной зоны нагрева и отсутствия материала припоя в соединении. Все исследователи [3, 4] отмечают, что двухфазные и мартенситные стали крайне чувствительны к нагревам в области критических температур, особенно к длительным. Во время выполнения кузовного ремонта традиционно используется ручная дуговая сварка, влияние которой может значительно изменить первоначальные характеристики деталей. В качестве альтернативного метода соединения можно рассматривать высокотемпературную пайку, которую рекомендуют некоторые производители для сталей со сложной микроструктурой [5]. Однако в литературе отсутствуют сведения, которые позволили бы планировать кузовные операции с учетом изменения прочностных характеристик металла в результате выполнения ремонта, а также прогнозировать дальнейшие эксплуатационные свойства автомобиля. Особенный интерес представляет исследование прочности соединений деталей из различных марок сталей и с разной степенью накопленной пластической деформации, свойственной кузовным деталям в ремонтном производстве.

Методика экспериментальных исследований

Для проведения экспериментальных исследований использовались двухфазные стали DP590, DP980 производства корпорации TATA-STEEL, мартенситная сталь 22MnB5 с медно-кремниевым покрытием (Arcelor USIBOR 1500P) и низколегированная сталь 08кп. Числа в обозначениях сталей определяют предел прочности стали в МПа.

Исследовались двухфазные стали толщиной 1 мм с гальваническим покрытием. Механические свойства сталей приведены в таблице 1.

Таблица 1 – Механические свойства исследуемых автомобильных сталей

Материал	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Максимальное удлинение, %
DP980	534	980	12,2
DP590	340	590	16,2
08кп	215	255	37,8
22MnB5	1000	1500	8

Химический состав исследуемых сталей:

DP980 – 0,135C; 2,1Mn; 0,35Mo; 0,05Si; 0,15Cr; 0,45Al; 0,007B.

DP590 – 0,326C; 1,7Mn; 0,123Si; 0,0162P; 0,0009S.

08кп – 0,08C; 0,27Mn; 0,002Mo; 0,041P; 0,009S; 0,021Si; 0,18Cu; 0,04As; 0,20Ni; 0,08Cr; 0,12Ni.

22MnB5 – 0,22C; 1,25Mn; 0,25Si; 0,013P; 0,004S; 0,040Al; 0,004N; 0,14Cr; 0,03Ti; 0,003B.

Прямоугольные пластины 300 мм × 100 мм, толщиной 1,0 мм сваривались по длинной стороне. Из сваренной заготовки вырезались образцы для испытания на растяжение в соответствии со стандартом ASTM-E08 таким образом, чтобы сварочный шов оказался по середине образца. Образцы сваривались дуговой сваркой в среде защитного газа с автоматической подачей сварочной проволоки. Использовались сварочные проволоки диаметром 0,9 мм, прочностью 620 МПа и 480 МПа. Сварка велась в среде аргона (90 %) и углекислого газа (10 %) при скорости расхода 30 л/мин.

Образцы растягивали при комнатной температуре на универсальной разрывной машине MTS 810 [4], с относительной скоростью деформации $0,001 \text{ с}^{-1}$, удлинение фиксировалось лазерным экстензометром LE-05. По диаграмме определялись предел текучести, предел прочности, максимальное удлинение до разрушения, скорость упрочнения. Предел текучести определялся при деформации 0,2 %.

Распределение микротвердости металла исследовалось микротвердомером Инстрон-Волперт (Instron-Wolpert) по Виккерсу под нагрузкой 300 Н и продолжительностью 15 с с шагом 0,5 мм. Все значения микротвердости представляют собой среднее значение по результатам трех идентичных измерений. Мониторинг температуры проводился с помощью бесконтактного инфракрасного пирометра.

Анализ результатов испытаний

Сварные соединения не содержали дефектов в виде пор и раковин, были выполнены на традиционных для малоуглеродистых сталей режимах.

Профили микротвердости соединений стали 22MnB5 с малоуглеродистыми и двухфазными сталями (рисунки 1–4) показывают, что мартенситная сталь, как и двухфазная, при сварке имеют зону термической деградации. Величина зоны была тем больше, чем выше была первоначальная прочность стали. В то время как низкоуглеродистая сталь 08кп фактически не имела разупрочнения, двухфазная сталь DP590 имела зону разупрочнения значительно меньше. В середине сварочного шва твердость зависела от прочности сварочной проволоки, используемой при сварке. Сварочная проволока прочностью 620 МПа (рисунок 2) продемонстрировала в сварочном шве мартенситную структуру и высокую твердость даже при соединении со сталью 08кп, в то время как проволока с прочностью 480 МПа показала значительное падение твердости в середине шва.

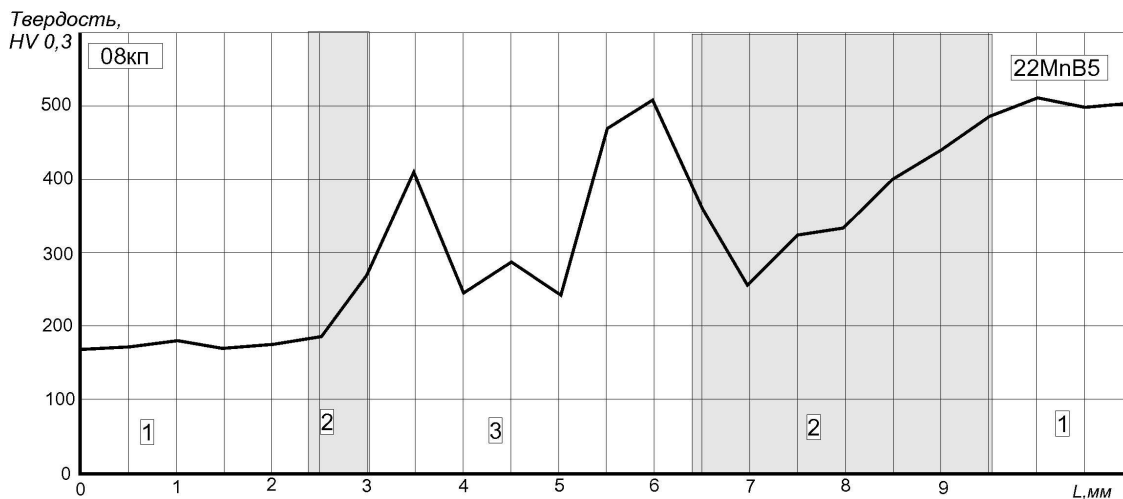


Рисунок 1 – Профиль микротвердости сварного соединения стали 08кп и мартенситной стали 22MnB5, сварочная проволока прочностью 480 МПа

Зона термической деградации мартенситной стали (зона 2, рисунок 1) имела самую большую ширину из всех исследуемых сталей и показала самое большое относительное падение твердости, почти на 50 % по сравнению с базовым материалом. Такое падение вызвано большим количеством мартенсита (98 %) в структуре базового металла, который при нагреве до температур, не превышающих критическую точку начала аустенитного превращения AC_1 , теряет прочность в результате частичного отпуска.

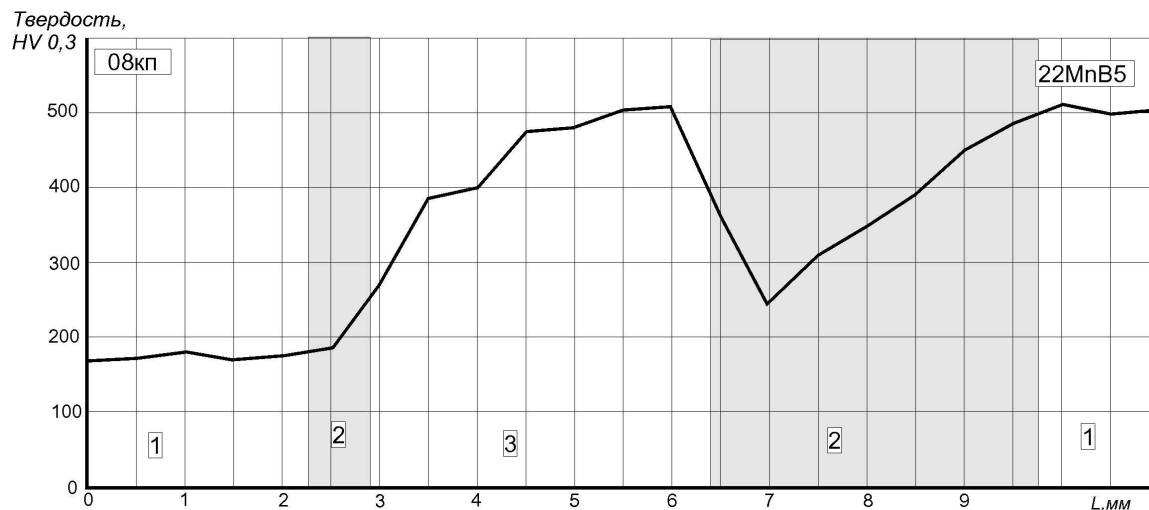


Рисунок 2 – Профиль микротвердости сварного соединения стали 08кп и мартенситной стали 22MnB5, сварочная проволока прочностью 620 МПа

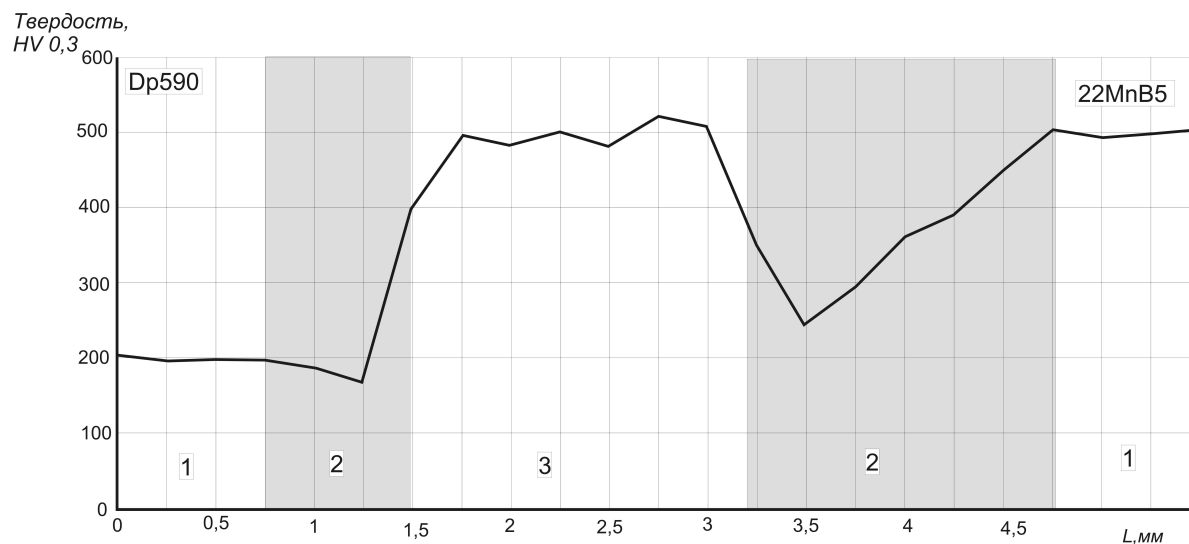


Рисунок 3 – Профиль микротвердости сварного соединения двухфазной стали DP590 и мартенситной стали 22MnB5

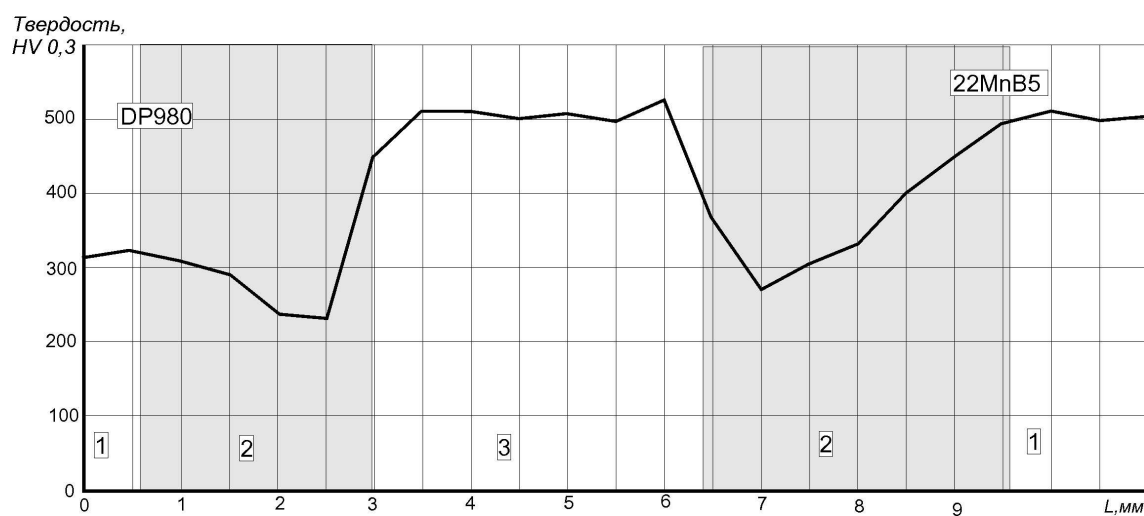


Рисунок 4 – Профиль микротвердости сварного соединения двухфазной стали DP980 и мартенситной стали 22MnB5

Зона термической деградации мартенситной стали была шире и относительное падение твердости – больше даже по сравнению с двухфазной сталью DP980. В целом поведение стали 22MnB5 в области

термической деградации имеет много общего с поведением двухфазной стали с высоким содержанием мартенсита.

Из-за значительного падения твердости мартенситных закаленных сталей и двухфазных сталей во время традиционной дуговой сварки в среде защитного газа возникли попытки применить высокотемпературную пайку для соединения деталей из термообработанных сталей. Паяные соединения двухфазной стали продемонстрировали сохранение цинкового покрытия, что подтверждает исследования других авторов. Причем в месте начала соединения металла и нанесенного припоя припой демонстрировал твердость, сравнимую с твердостью стали (рисунок 5, а). Это было вызвано, скорее всего, эффектом образования мартенситных структур за счет смешивания цинкового покрытия и материала припоя (рисунок 5, б).

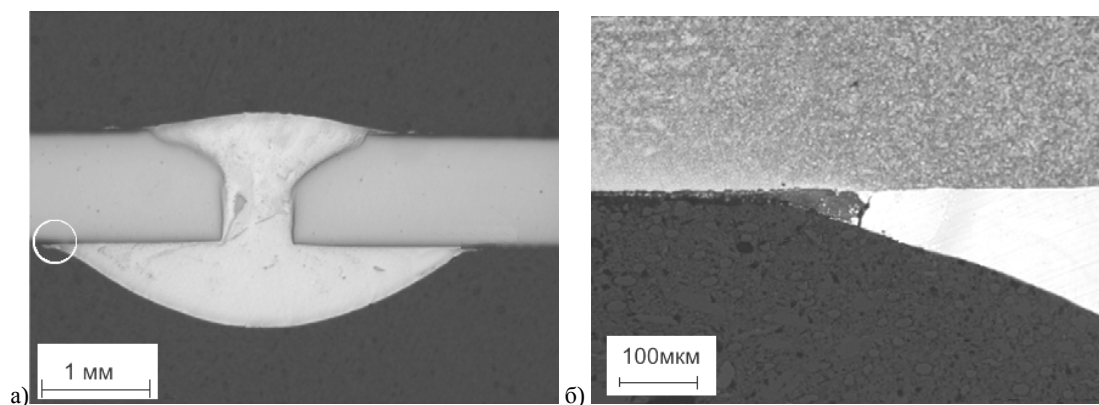


Рисунок 5 – Паяное соединение стали DP980 с цинковым покрытием:
а) увеличение $\times 20$, б) увеличение $\times 150$

Профиль микротвердости снимался в поперечном сечении паяного соединения (рис. 6). Двухфазная и мартенситная стали продемонстрировали зоны термической деградации, но в силу того, что температура во время пайки (припой CuSi3) не достигает температуры плавления стали, эти зоны были уже по сравнению со сварными соединениями. Во время выполнения соединительных операций температура не превышала 950°C .

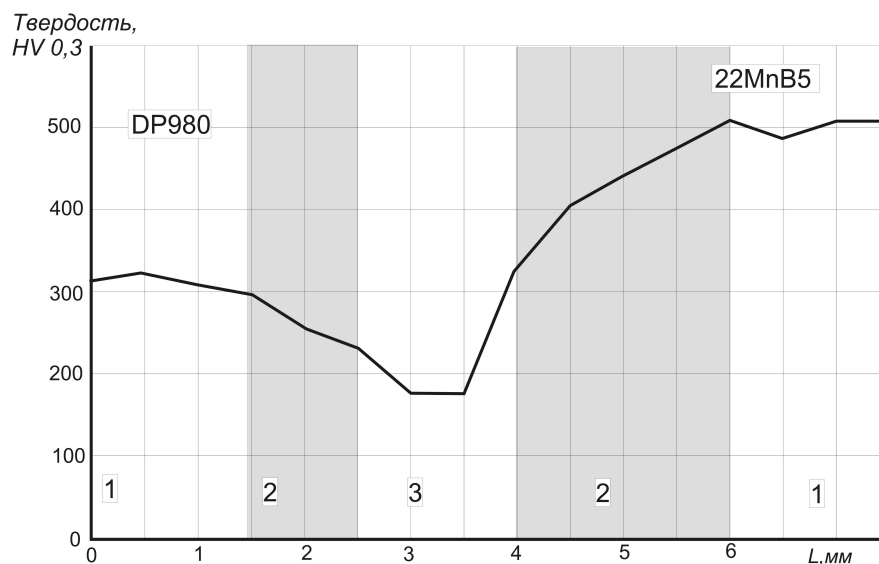


Рисунок 6 – Микротвердость паяного соединения мартенситной стали 22MnB5 и двухфазной стали DP980

При растяжении образцов разрушения происходили в области термической деградации сталей. При испытании на растяжение дополнительный припой в месте соединения не удалялся, поэтому, несмотря на меньшую прочность припоя, разрыв происходил в месте деградации сталей, а не в месте пайки.

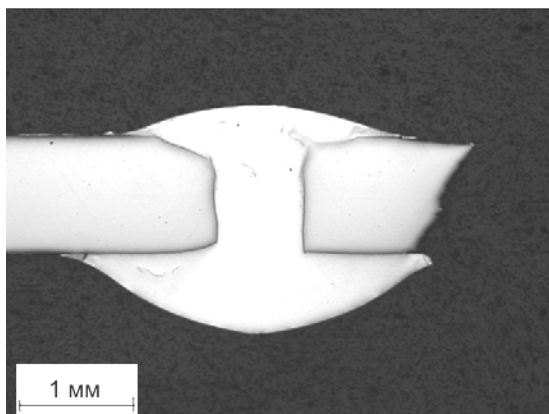


Рисунок 7 – Разрушение паяного образца 22MnB5 и стали DP980 в области DP980

В связи с тем, что толщина и ширина паяного шва в месте соединения не отслеживались и не обрабатывались, то они в несколько раз могли превышать толщину стального образца. Построение традиционных диаграмм растяжения для стандартных образцов было бы неверным, так как площадь поперечного сечения соединения не соответствует площади образцов. В таких условиях характеризовать прочность соединения удобно диаграммой усилия растяжения (рисунки 8, 9).

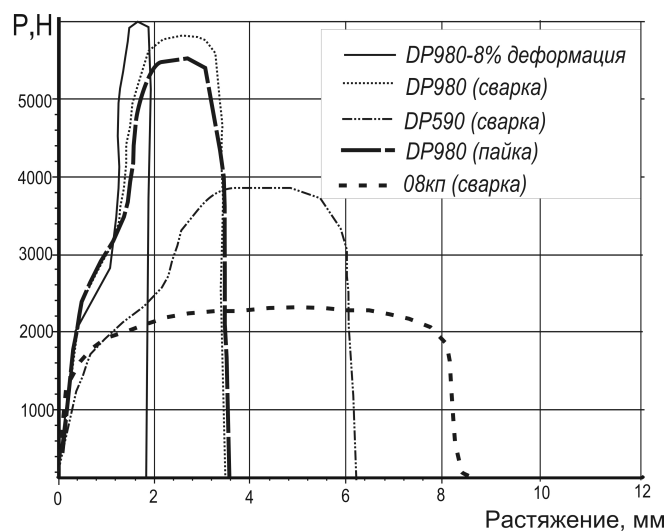


Рисунок 8 – Графики усилий растяжений образцов автомобильных сталей толщиной 1 мм

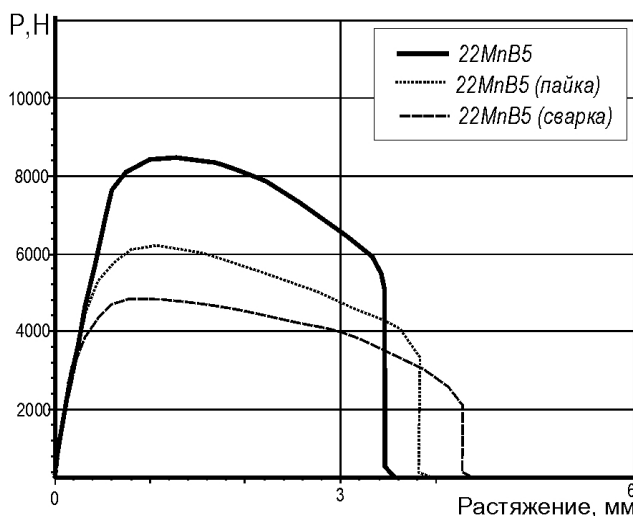


Рисунок 9 – Усилие растяжения стали 22MnB5 (1 мм): в состоянии поставки, сварное соединение, паяное соединение

Диаграммы растяжения показывают зависимость прочности соединений двухфазных и мартенситных сталей от технологической температуры соединительной операции.

Таблица 2 – Результаты испытаний прочности исследуемых сварных и паяных соединений

№	Материал 1	Материал 2	Вид соединения	Удлинение до разрушения, мм	Макс нагрузка, кН
1	DP980	DP 590	Сварка, проволока 620МПа	5,81/0,17	3,99/ 008
2	DP980	DP 590	Сварка, проволока 480МПа	6,22/ 0,53	3,78/ 0,055
3	DP980	08кп	Сварка, проволока 620МПа	8,95/ 0,11	2,291/ 0,013
4	DP 590	DP 590	Сварка, проволока 620МПа	6,12/ 0,28	3,894/ 0,019
5	DP980	DP980	Сварка, проволока 620МПа	4,22/ 0, 24	4,82/ 0,006
6	22MnB5	08кп	Сварка, проволока 480МПа	9,21/ 0,31	2,23/ 0,022
7	22MnB5	DP980	Сварка, проволока 620МПа	3,10/ 0,18	4,79/ 0,041
8	22MnB5	DP 590	Сварка, проволока 620МПа	5,72/ 0,20	4,032/ 0,038
9	22MnB5	22MnB5	Сварка, проволока 620МПа	2,82/ 0,25	4,935/ 0,028
10	22MnB5	DP980	Пайка, припой SiCu3	5,85/	5,71
11	22MnB5	22MnB5	Пайка, припой SiCu3	5,33	6,15
12	DP980	DP980	Пайка, припой SiCu3	5,51	5,52
13	22MnB5	08кп	Сварка, проволока 620МПа	9,15	2,351

Исследования подтверждают возможность использования высокотемпературной пайки в ремонтном производстве при соединении деталей, изготовленных из материалов с большим содержанием мартенситной фазы. Уменьшение температуры при использовании высокотемпературной пайки повысило усилие разрыва на 22,5 % для мартенситной стали и 12 % для двухфазной стали DP980 по сравнению с операциями дуговой сварки.

Использование для пайки сварочного полуавтоматического аппарата в среде защитного газа не требует дополнительных затрат на переоборудование гаражных ремонтных хозяйств, поэтому может рассматриваться как перспективный метод соединения современных автомобильных сталей.

Выводы

В целом термообработанные стали продемонстрировали значительное падение механических свойств при выполнении сварки. Пренебрегать таким снижением прочности во время ремонтных операций нельзя, особенно при ремонте деталей, отвечающих за пассивную безопасность кузова. Более прочные стали с высоким содержанием мартенситной фазы продемонстрировали большее снижение прочности, чем менее прочные стали. Такое поведение объясняется тем, что механизм разупрочнения связан с отпуском мартенсита во время нагрева до температур, близких к точке AC_1 .

С точки зрения обеспечения механических свойств двухфазных сталей, их свариваемость можно охарактеризовать как неудовлетворительную, особенно это относится к высокопрочным сталям с высоким содержанием мартенсита. При планировании сварочных операций необходимо учитывать разупрочнение и выбирать технологию соединения с меньшими температурами нагрева и меньшей длительностью термического воздействия. Для двухфазных и мартенситных сталей высокотемпературная пайка может являться альтернативой дуговой сварке. Прочность паяных соединений у них была выше, чем сварных, а также наблюдалось сохранение цинкового защитного покрытия, что приводит к увеличению ресурса изделий в эксплуатации. Любые соединительные операции для подобных сталей должны проводиться с контролем температуры и продолжительности нагрева. Бесконтрольные нагревы могут привести к значительному падению прочностных характеристик.

Проведенные исследования позволяют планировать эксплуатационные свойства автомобильных деталей после выполнения ремонта. Выбор метода соединения кузовных деталей должен основываться на анализе материала детали, ее служебного назначения и допустимого ослабления в месте соединения.

Библиографический список использованной литературы

1. Xia M.S. 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 & Joining. — 2008. — No. 13. — P. 378 – 387.
2. 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 & Joining. — 2006. — No. 11. — P. 384 – 388.

3. Kang C.-Y. Characteristics of Nd: YAG Laser Welded 600 MPa Grade TRIP and DP Steels / C.Y. Kang, T.K. Han, B.K. Lee, J.K. Kim // Material Science Forum, 539–543. — 2007. — P. 3967 – 3972.

4. Фалалеев А.П. Обеспечение пассивной безопасности автомобилей при кузовном ремонте: монография / А.П. Фалалеев. — Севастополь: СевНТУ, 2012. — 153 с.

5. Byun T.S. Tensile Properties and Inhomogeneous Deformation of Ferrite-Martensite Dual-Phase Steels / T.S.Byun, I.S. Kim // Journal of Materials Science & Technology. — 1993. — No. 28. — P. 2923 – 2932.

Поступила в редакцию 21.06.2012 г.

Фалалеев А.П. Дослідження впливу технології з'єднань загартованих кузовних сталей на їх експлуатаційні властивості

Досліджено міцність зварних та паяних з'єднань двофазних та мартенситних автомобільних сталей. Досліджено зони знеміцнення зварних конструкцій з термооброблених сталей в умовах кузовного ремонту. Експериментально з'ясовано вплив з'єднувальних операцій на експлуатаційні властивості кузовних сталей.

Ключові слова: двофазна сталь, мартенситна сталь, дугове зварювання, високотемпературна пайка.

Falaleev A.P. Investigation of the joining technology influence on the operational properties of thermotreated car body steels

The strength of welded and brazed joints of two-phase and martensitic steels is investigated. Weakness zones of welded constructions produced from thermotreated steels in car body repair conditions are studied. The joining technology influence on the operational properties of car body steels is experimentally determined.

Keywords: two-phase steel, martensitic steel, arc welding, brazing.