

УДК 629.113.011

Фалалеев А. П., к.т.н.

Севастопольский национальный технический университет, г. Севастополь

ВЛИЯНИЕ ТЕМПЕРАТУРНЫХ РЕЖИМОВ КУЗОВНОГО РЕМОНТА НА ЭВОЛЮЦИЮ МЕХАНИЧЕСКИХ СВОЙСТВ ДВУХФАЗНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ СТАЛЕЙ

Экспериментально исследовано влияние температурных режимов кузовного ремонта на эволюцию пределов прочности и пластичности деталей, изготовленных из двухфазной стали DP980. Найдены коэффициенты эмпирической эволюционной зависимости предельных поверхностей прочности и текучести от технологических режимов ремонта. Показано, что для двухфазной стали наблюдается значительное разупрочнение и уменьшение работы упрочнения при нагреве.

Использование производителями автомобилей для изготовления несущих деталей кузовов двухфазных сталей позволило снизить вес автомобиля и повысить пассивную безопасность, но при этом остро встала проблема термического воздействия во время выполнения ремонтных операций. Технологические операции, связанные с применением тепла, такие как сварка, вытяжка поврежденных деталей с предварительным нагревом – «на горячую» могут существенно изменить механические свойства закаленных сталей.

Современные стали обладают технологической наследственностью, поэтому их механические свойства зависят от направления и величины приобретенной пластической деформации, температур нагрева и длительности выдержки при этих температурах.

Исследованию эволюции механических свойств двухфазных сталей в зависимости от накопленных пластических деформаций посвящены работы [1, 2]. В работах [2, 3] исследуется влияние температур закалки и отпуска на прочность и пластичность двухфазных сталей. Авторами отмечается существенное изменение величины упрочнения, которое связано с объемом мартенситной фазы в микроструктуре полученной стали. В работах [3, 4] демонстрируется значительная деградация твердости в зоне термического нагрева при выполнении лазерной сварки. В работе [4] исследуется изменение свойств сталей при растяжении нагретых образцов. Несмотря на большой объем работ, посвященных исследованию влияния нагревов на свойства двухфазных сталей в условиях массового производства, нерассмотренным остается вопрос возможности моделирования эволюции механических свойств двухфазных сталей в условиях ремонтного производства. Особенностью ремонтного производства является кратковременность температурных воздействий, неизотермические условия нагрева и множество возмущающих воздействий случайного характера.

Для исследования влияния ремонта на состояние двухфазных сталей были выделены режимы нагрева, возможные при выполнении различных технологических операций. Графики нагрева-охлаждения, соответствующие различным видам технологических операций, представлены на рисунке 1.

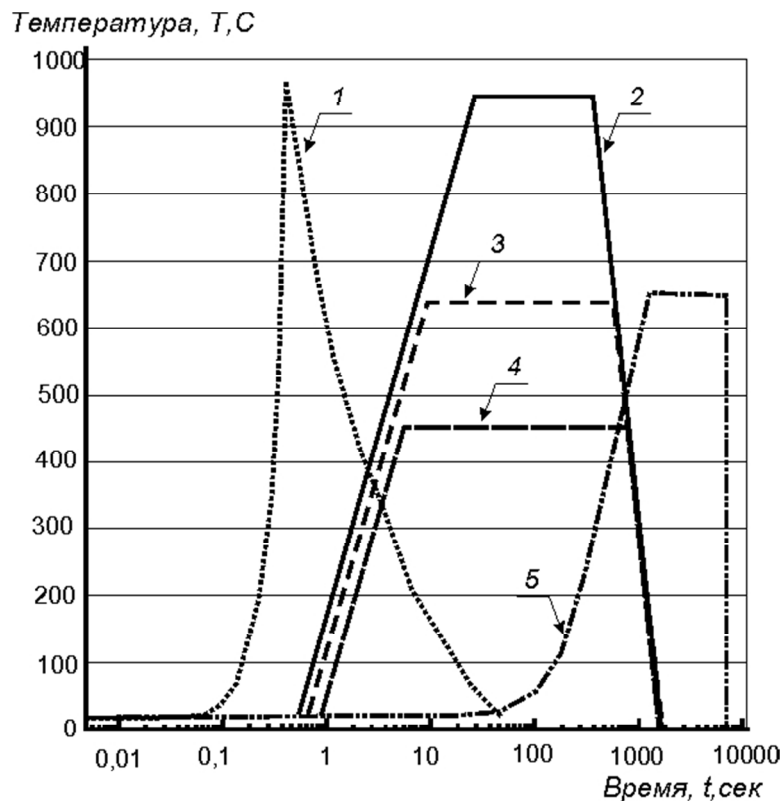


Рисунок 1 – режимы нагрева при ремонтных операциях:

- 1 – контактная точечная сварка; 2 – дуговая полуавтоматическая сварка;
 3, 4 – высокотемпературная пайка различными припоями в среде защитного газа;
 5 – изотермический нагрев при ремонтной вытяжке с нагревом

Цель работы

Исследование влияния температуры технологического нагрева деталей при выполнении кузовного ремонта автомобиля на эволюцию механических свойств двухфазных сталей.

Методика исследования

Для исследования влияния термического воздействия на свойства двухфазной стали проводились испытания образцов на растяжение после остывания при нагревах с разной выдержкой. Образцы укладывались в прогретую муфельную печь на 20 с, 5 мин. и 20 мин., затем охлаждались на воздухе. Выдержка 20 с была выбрана экспериментально для используемых образцов, с учетом, что за это время образцы успевали нагреваться до температуры испытания, так, что выдержка при пиковой температуре составляла не более 2 сек. Образцы нагревались и выдерживались при температурах 300 °С, 400 °С, 500 °С, 600 °С, 650 °С. После охлаждения образцы растягивались, при этом снималась кривая напряжение-деформация. Образцы растягивали при комнатной температуре на универсальной разрывной машине со скоростью 0,001 с⁻¹. Деформация в процессе испытания измерялась при помощи экстензометров на длине 25 мм. По диаграмме определялись предел текучести, предел прочности, максимальное удлинение до разрушения. Предел текучести определялся при деформации 0,2 %.

Для испытаний использовались образцы двухфазной стали DP980 производителя Тата-стил толщиной 1,2 мм с гальваническим покрытием и с химическим составом (С – 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 AC₃ – 862 °С, AC₁ – 724 °С.

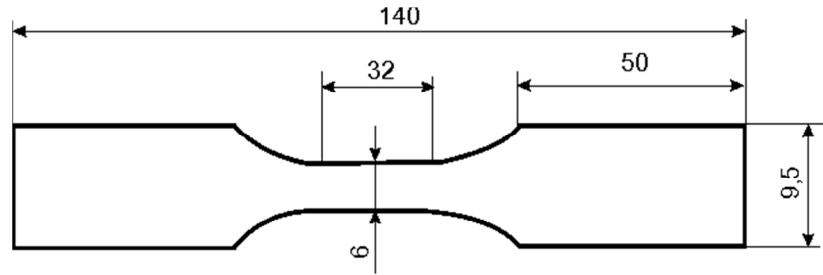


Рисунок 2 – Образец для испытаний на растяжение

Для исследования на растяжение использовались образцы в соответствии со стандартом ASTM-E08. Геометрия образцов приведена на рисунке 2. Окончательная подготовка поверхности образцов проводилась абразивной шкуркой в направлении растяжения зернистостью 600.

Эволюция прочностных характеристик в зависимости от температурных режимов ремонта стали

Диаграммы растяжения двухфазной стали DP980 (рисунок 3 а, б, в), подвергавшейся предварительному нагреву и охлаждению в зоне температур до точки AC_1 с различной выдержкой демонстрируют тенденцию к уменьшению предела прочности с ростом температур нагрева.

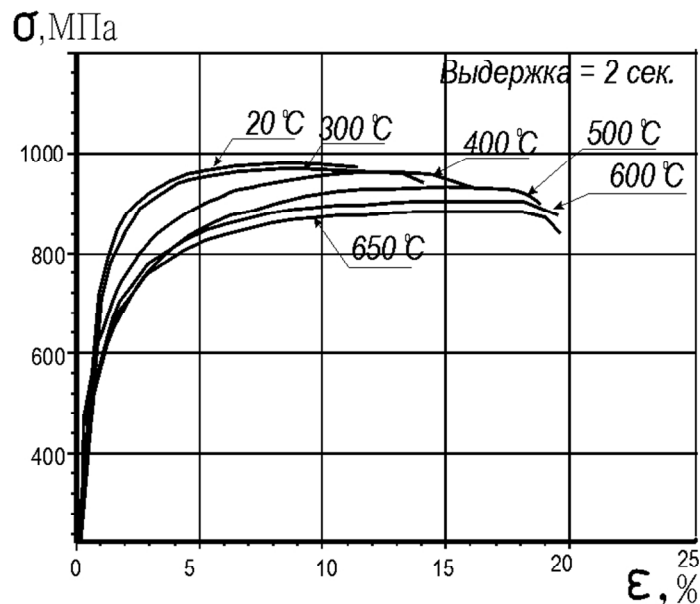


Рисунок 3 а – Диаграммы растяжения стали DP980 после нагрева, выдержки 2 секунды и последующего охлаждения до температуры 20 °С

Графики напряжение-деформация при всех значениях технологической выдержки представляли собой семейства расположенных друг под другом характеристик с максимальным значением, не выходящим за пределы графика при предыдущей температуре испытания. Значительное увеличение максимальной деформации (на 9 %) наблюдалось при первой температуре испытания 300 °С (рисунок 3 б, в). При дальнейшем увеличении температуры изменение величины деформации лежало в пределах погрешности измерения для выдержек 5 и 20 мин. При 2 секундной (рисунок 3 а) выдержке происходил последовательный рост величины максимального удлинения до 8–9 %, что подтверждает предположение о том, что увеличение максимальной пластической деформации наблюдается за счет релаксации напряжений при нагревах до 300 °С в пределах 8–10 %. При незначительной вы-

держке времени для снятия напряжения во всем объеме материала недостаточно, поэтому при температурах выше 300 °С продолжает наблюдаться увеличение максимального удлинения, но в пределах 10 %.

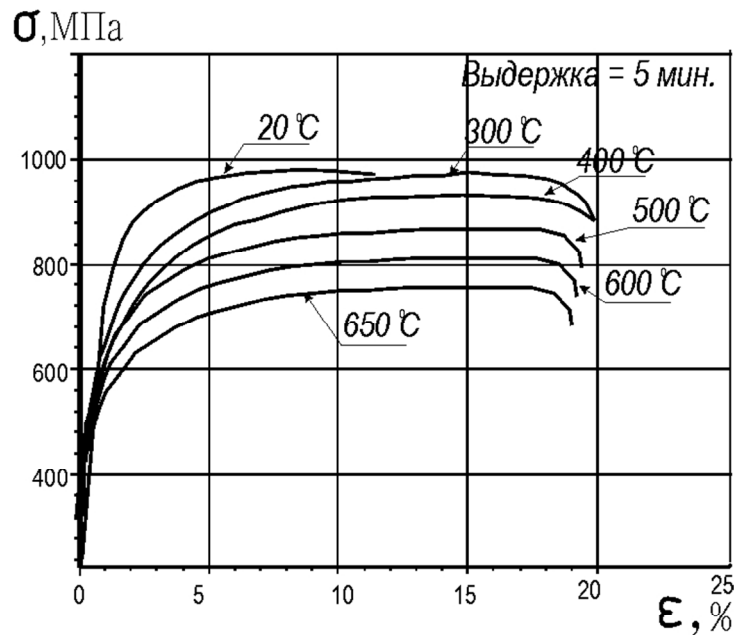


Рисунок 3 б – Диаграммы растяжения стали DP980 после нагрева, выдержки 5 минут и последующего охлаждения до температуры 20 °С

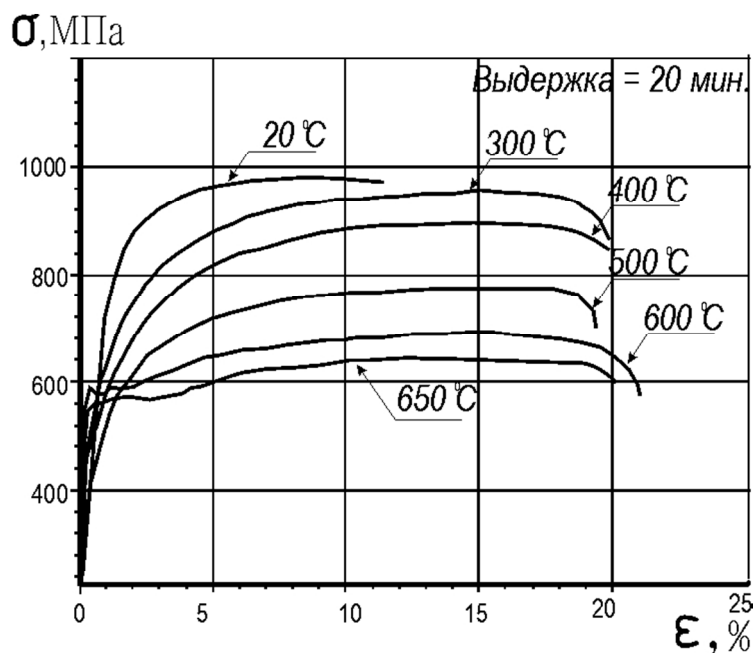


Рисунок 3 в – Диаграммы растяжения стали DP980 после нагрева, выдержки 20 минут и последующего охлаждения до температуры 20 °С

Особый интерес представляет моделирование поведения стали при технологических нагревах, что позволит разрабатывать технологию ремонта, обеспечивающую свойства материала и исследовать поведение конструкции кузова после технологических воздействий.

Анализ диаграмм растяжения (рисунки 3 а, б, в) показал, что предел прочности стали последовательно снижается с увеличением температуры и выдержки (рисунок 4). Хотя представленные данные продемонстрировали зависимость свойств стали от объема тепловой энергии, поглощенной металлом, но следует отметить, что анализ результатов экспе-

риментов, не вошедших в данную статью показывает, что график 3 (рисунок 4) является предельным графиком насыщения и дальнейшее увеличение времени выдержки не приводило к существенным отличиям от графика 3 (рисунок 4).

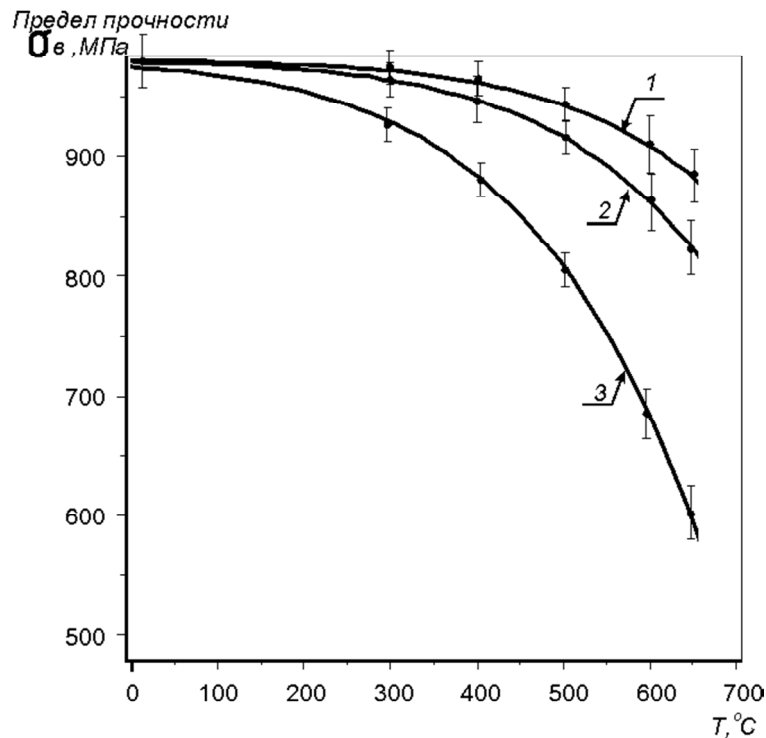


Рисунок 4 – Экспериментальная зависимость и результат моделирования предела прочности стали DP980 от температуры и длительности технологического нагрева:

- 1 – нагрев с выдержкой 2 сек при максимальной температуре;
- 2 – нагрев с выдержкой 5 мин. при максимальной температуре;
- 3 – нагрев с выдержкой 20 мин. при максимальной температуре

Это доказывает, что 20 минутной выдержки достаточно для протекания равновесных процессов и этот режим можно считать изотермическим, в то время как нагрев с выдержками до 20 мин. можно считать неизотермическими и протекающие процессы носят незавершенный характер. Для незавершенных состояний актуальным будет вопрос устойчивости достигнутого состояния полученных свойств и влияние на них процессов дальнейшего старения.

Моделирование зависимости предела прочности от режимов технологического нагрева функцией вида (1) позволяет описывать поведение стали в исследуемом диапазоне температур и времени с погрешностью, не превышающей 12 %.

$$\sigma_B = \sigma_{B0} - B_1(B_2 + B_3 \cdot t^{0,6}) \left(\frac{T}{T_{AC1}} + B_4 \right)^{8,2}, \quad (1)$$

где σ_{B0} – предел прочности базового металла;

T_{AC1} – первая критическая температура фазового перехода (точка AC_1 диаграммы состояния железо-углерод);

t – время выдержки при максимальной температуре, секунды;

B_1, B_2, B_3, B_4 – постоянные, определяемые экспериментально.

С помощью метода наименьших квадратов были найдены коэффициенты модели для описания общей зависимости от пиковой температуры и выдержки в виде степенной регрессии.

$$\sigma_B = 980 - 3,27(0,037 + 0,002 \cdot t^{0,6}) \left(\frac{T}{724} + 1,27 \right)^{8,2}. \quad (2)$$

Важнейшей характеристикой двухфазной стали, используемой при изготовлении кузовов автомобиля, является ее высокая степень упрочнения при деформации, являющаяся следствием малых значений отношений предела пластичности к пределу прочности стали. Поэтому, рассматривая сохранение свойств металла при ремонте, крайне важным является сохранение величины упрочнения, которое позволяет поглощать большие объемы энергии при деформации, вызванной столкновением.

Исследование диаграмм растяжения (рисунки 3 а, б, в) показало, что точка наступления текучести стали DP980 менялась в зависимости от температурных режимов, причем характер изменения был противоположен изменению предела прочности стали (рисунок 5).

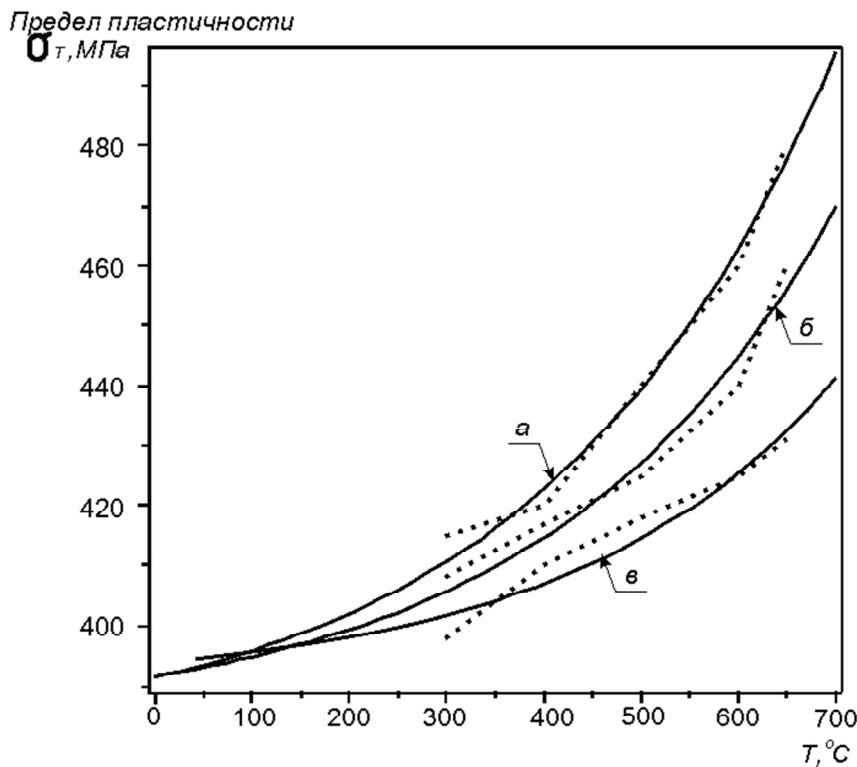


Рисунок 5 – Влияние температуры технологического нагрева на величину предела пластичности стали DP980 при разных значениях выдержки:
 а – выдержка 20 мин.; б – выдержка 5 мин.; в – выдержка 2 секунды;
 пунктирная линия – экспериментальные данные;
 сплошная линия – результат моделирования

Моделирование результатов эксперимента выполнялось функцией вида

$$\sigma_T = \sigma_{T0} + (C_1 + C_2 \cdot t^{0,6}) \left(\frac{T}{C_4} + C_3 \right)^{4,85}, \quad (3)$$

где σ_{B0} – предел прочности базового металла;

t – время выдержки при максимальной температуре, секунды;

C_1, C_2, C_3, C_4 – постоянные, определяемые экспериментально.

Поиск коэффициентов модели осуществлялся методом наименьших квадратов и для стали DP980 уравнение (3) можно записать в следующем виде:

$$\sigma_T = 390 + (10,07 + 0,1672 \cdot t^{0,6}) \left(\frac{T}{1000} + 0,7 \right)^{4,85} . \quad (4)$$

Из анализа поведения уравнений (2) и (4) видно (рисунок 6), что графики функций предела прочности и предела пластичности под воздействием дополнительной тепловой энергии во время ремонта эволюционируют в противоположных направлениях (рисунок 6), ухудшая тем самым свойство двухфазной стали поглощать энергию деформации.

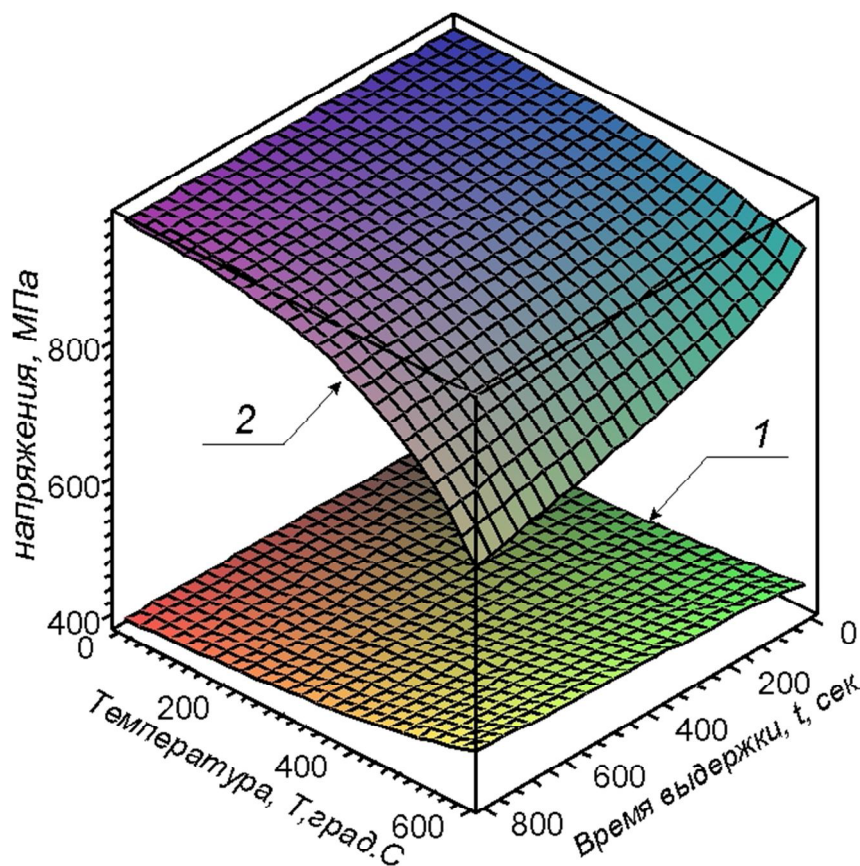


Рисунок 6 – Эволюция предельной поверхности прочности (2) и поверхности течения материала (1) под воздействием технологического ремонтного нагрева

Подобное поведение стали можно объяснить тем, что при нагреве происходит частичный отпуск мартенсита, что приводит к уменьшению предела прочности [2]. Начало пластичности двухфазных сталей обусловлено в первую очередь деформацией феррита, в котором при нагреве происходит осаждение карбидов, которые и препятствуют свободному движению дислокаций [3].

Полученные результаты согласуются с данными, полученными другими авторами при исследовании поведения двухфазных сталей.

Выводы

Эволюционные уравнения (3), (4) оценивают расположение предельных поверхностей течения и сопротивления материала с погрешностью, не превышающей 12 %, что позволяет их использовать при качественном и количественном моделировании процессов ремонта и поведения восстановленного кузова при столкновениях.

Феноменологический характер полученных зависимостей позволяет их использовать для стали DP980, но при этом раскрывает характер поведения двухфазных сталей при нагреве. Даже кратковременный нагрев до температур, сравнимых с критическими температурами фазовых переходов приводит к деградации свойств стальных конструкций. Это обуславливает необходимость планирования и контроля температуры во время ремонта. Сварочные операции необходимо выполнять по технологии прерывистого шва с паузами для охлаждения, причем длина швов должна рассчитываться исходя из величины допустимого ослабления. При соединении деталей предпочтение следует отдавать методам с температурами нагрева до критических значений фазовых переходов, таким как высокотемпературная пайка.

Интерес дальнейшего исследования представляют влияние нагрева на свойства предварительно деформированной стали, величина допустимого ослабления деталей из расчета обеспечения заданного уровня пассивной безопасности, а также критерии неразрушающего контроля качества ремонта, позволяющие определить текущие свойства стали кузова после ремонта с неизвестными режимами.

Список литературы

1. Огородников В.А. Приложение метода определения напряженно-деформированного состояния в пластической области измерением твердости деформированного металла к решению задач технологической механики / В.А. Огородников // Вопросы механики и физики процессов резания и холодного пластического деформирования // Сборник научных трудов института сверхтвердых материалов НАН Украины. Серия Г. Процессы механической обработки. – К., 2002. – С. 359–366.
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. 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.
4. 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. – 1999. – 30 – P. 1193–1202.

Рецензент: к.т.н., доц. М.А. Мастепан, АДІ ДВНЗ «ДонНТУ».

Стаття надійшла до редакції 04.09.12
© Фалалеев А.П., 2012