

### ВІДНОВЛЮВАНІСТЬ АВТОМОБІЛЬНИХ КУЗОВІВ ІЗ ДВОФАЗНИХ СТАЛЕЙ ПРИ ЗАСТОСУВАННІ РЕМОНТНИХ НАГРІВІВ

*Досліджено можливість відновлення кузовних деталей з двофазної сталі методом витяжки з нагріванням. Показано, що існує можливість збереження властивостей пасивної безпеки при використанні локальних контрольованих нагрівів до температур, що забезпечують рівномірність пластичності в зоні виконання витяжки. Експериментально отримано модель поведінки нагрітої двофазної сталі DP780, знайдено коефіцієнти емпіричної залежності.*

**Вступ.** Широке поширення двофазних сталей при виготовленні несучих деталей автомобільних кузовів обумовлено бажанням знизити вагу автомобіля і підвищити пасивну безпеку. Двофазні сталі відрізняються від традиційних низьковуглецевих феритно-мартенситною структурою, яка характеризується значною роботою зміцнення при пластичній деформації. Така структура утворюється в результаті загартування сталей з області температур у діапазоні критичних температур AC1-AC3. У процесі ремонту таких сталей з нагріванням виникає небезпека зміни первісної мікроструктури і, як наслідок, втрата експлуатаційних властивостей. Відновлення лонжеронів традиційно виконувалося методами холодної витяжки, витяжки на гарячу, відрізанням пошкодженої частини лонжерона і приварюванням нової або відновленої. Сучасне використання термооброблених сталей з високим зміцненням призводить до того, що деформаційне зміцнення створює анізотропію властивостей металу. Деформовані ділянки мають більш високу межу пластичності, тому при холодній витяжці починають деформуватися цілі ділянки, що призводить до ще більшого порушення геометрії кузова. Нагрівання лонжеронів у місцях найбільших деформацій призводить до відновлення геометрії, але залишаються невизначеними властивості сталей, у зв'язку з термічним впливом на термооброблені двофазні сталі.

**Аналіз останніх досліджень та публікацій.** Дослідженню питань деградації властивостей двофазних сталей при ремонтних термічних впливах присвячені роботи [1, 2]. В роботі [3] досліджується зміна твердості двофазних сталей при зварюванні в зоні термічного впливу. Зменшення міцності після охолодження пояснюється частковим відпуском мартенситу. Для моделювання еволюції межі пластичності в умовах ремонтних нагрівів, які носять неізотермічний характер пропонується враховувати максимальну температуру нагріву і час витримки при цій температурі:

$$R(\varepsilon, T, t) = \left[ -\alpha(T, t) \cdot K_2 \cdot \varepsilon^{n_2} + \alpha(T, t) \cdot \sigma_0 - (\sigma_0 - B_6) \exp(-a_1 \cdot \varepsilon) \right] \cdot \left[ 1 + \frac{C_1 \cdot t^{n_3} \left( \frac{T}{C_3} + C_2 \right)^{n_6}}{\sigma_0} \right], \quad (1)$$

$$\text{де } \alpha(T, t) = \left[ 1 - \frac{\sigma_{B0} - B_1 \cdot t^{n_3} \left( \frac{T}{T_{AC1}} + B_2 \right)^{n_4}}{\sigma_{B0}} \right]; \quad (2)$$

$T$  – температура нагріву, С;  $T_{AC1}$  – температура критичної точки фазового переходу AC1;  $\varepsilon$  – накопичена пластична деформація;  $\sigma_{B0}$  – границя міцності базового металу, МПа;  $t$  – час витримки при максимальній температурі, с;  $R(\varepsilon, T, t)$  – функція еволюції межі пластичності нагрітого металу після охолодження;  $K_2, n_2, \sigma_0, B_6, a_1, C_1, C_2, C_3, B_1, B_2, n_3, n_4$  – емпіричні коефіцієнти.

Однак недослідженим залишається питання можливості відновлення деталей кузова, вплив локальних змін міцності в результаті місцевих нагрівів на поведінку конструкції в цілому. Для моделювання операцій витяжки деформованих деталей з нагріванням були проведені експериментальні дослідження, що містять попереднє стиснення і подальше розтягнення з нагріванням. Така послідовність навантаження характерна для операцій ремонту деформованого автомобіля.

**Викладення основного матеріалу.** *Методика експериментальних досліджень.* Монотонне розтягнення і реверсивне навантаження (стиснення–розтягнення) проводилося на універсальній розривній машині MTS 810 з пристосуваннями для фіксації зразка від втрати стійкості при стисненні і пристосуванням для нагріву зразків під час випробувань. Подовження фіксувалося лазерним екстензометром LE-05. Для запобігання втрати стійкості до випробувального зразка прикладалися з двох боків однакові бічні сили 3,35 кН, створювані пневмоциліндрами. Стабілізуюча бічна сила прикладалася до зразка через набір роликів і пластин з тефлоновим покриттям для зменшення тертя.

При використанні стабілізуючих бічних зусиль необхідно виконувати корекцію показань з урахуванням сил тертя між зразком і підтримуючими пластинами з урахуванням складнонапруженого стану зразка в момент випробування [4]. Коефіцієнт тертя був визначений за результатами розподілу осьового зусилля при нормальному навантаженні. Середнє значення в серії однорідних експериментів було 0,165.

Нагрівання зразків відбувалося за рахунок теплообміну з нагрівальним елементом через пластини з тефлоновим покриттям. Для ізоляції всіх механізмів розривної машини від впливу тепла використовувалися дистанційні дубові проставки. Контроль температури здійснювався за допомогою тарованої термопари, встановленої в центрі притиски нагрівальних пластин.

На етапі розтягування, попередньо стиснений метал нагрівався до температур 150 °С, 300 °С, 450 °С. У такі умови потрапляє кузов автомобіля при спробах виконати витяжку з нагріванням. Діаграми стиснення–розтягнення були зняті для зразків з двофазних сталей DP780 (рис. 1). Зі зростанням температури сталь демонструвала зменшення міцності і пластичності, а також зміна швидкості зміцнення.

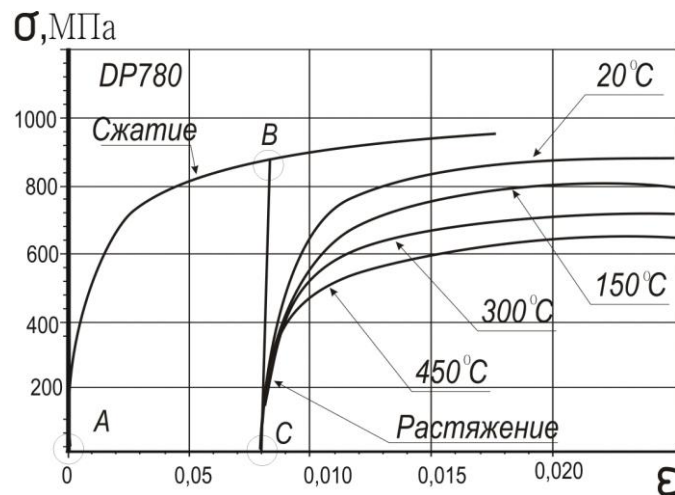


Рис. 1. Діаграма стиснення–розтягнення сталі DP780 при температурах 20 °С, 150 °С, 300 °С, 450 °С

*Моделювання властивостей металу при нагріванні.* Для опису поведінки сталі в нагрітому стані була використана емпірична залежність, яка представлена у вигляді добутку функцій ізотропного зміцнення  $h_1$  і термічної еволюції  $h_2$ :

$$\sigma = \sigma(\varepsilon, T_H) = h_1(\varepsilon, T_H) \cdot h_2(T_H). \quad (3)$$

Функція  $h_1$  відображає вплив ступеня пластичної деформації, враховуючи характер зміни зміцнення під дією температури.  $h_1$  є комбінованою функцією  $g_1(\varepsilon)$  і  $g_2(\varepsilon)$ :

$$h_1(\varepsilon, T_H) = \beta(T_H)g_1 + (1 - \beta(T_H))g_2, \quad (4)$$

де  $T_H$  – температура нагріву сталі;  $\varepsilon$  – накопичена пластична деформація металу.

Функція  $g_1(\varepsilon)$  відображає поведінку кривої зміцнення при температурі 20 °С, в той час, як під дією нагрівання функція пластичності все більше приймає вигляд  $g_2(\varepsilon)$ . Перехід від одного виду до іншого здійснюється відповідно до функції  $\beta(T_H)$ . Функція  $\beta(T_H)$  набуває значення від 0 при 20 °С до 1 при 450 °С. При  $\beta(T_H) = 0$   $h_1$  вироджується до  $g_2(\varepsilon)$ , а при значенні  $\beta(T_H) = 1$  – до стану  $g_1(\varepsilon)$ . Вигляд функцій може обиратися будь-який з досліджених в розділі 1 функцій. Для опису зміцнення

металу в нормальних умовах була використана функція Холломона [5], а для нагрітого – функцію Войс [6].

$$g_1(\varepsilon) = K \cdot \varepsilon^n, \quad (5)$$

$$g_2(\varepsilon) = \sigma_0(1 - A \exp(-B\varepsilon)). \quad (6)$$

Тоді (4) запишемо у вигляді:

$$h_1(\varepsilon, T_H) = \beta(T_H)K \cdot (\varepsilon)^n + (1 - \beta(T_H))\sigma_0(1 - A \cdot e^{-B\varepsilon}). \quad (7)$$

Для функції  $\beta(T)$  зручно обирати простий лінійний закон:

$$\beta(T_H) = \beta_1 - \beta_2(T_H - T_0), \quad (8)$$

де  $\beta_1, \beta_2$  – постійні, які визначаються з експериментальних даних,  $T_H$  – температура нагріву сталі,  $T_0$  – базова температура, використовувалось значення 20 °С.

Необхідність розробки даної функції слід з діаграм розтягу двофазних сталей (рис. 1) при різних температурах. З графіків чітко видно, що швидкість зміцнення дійсно залежить від температури, зменшуючись зі збільшенням температури. Така поведінка не відображена традиційними феноменологічними моделями.

Для функції  $h_2(T_H)$  використовуємо просту лінійну функцію. Температурний нагрів в умовах ремонту неможливо проконтролювати з високою точністю, через великі обсяги нагрівання металу, теплопровідність і теплоємність матеріалу, тому точність лінійної залежності, навіть при деякій похибці буде вищою за методи контролю температури при виконанні ремонтних операцій; де  $\beta_3$  – експериментальна постійна.

Остаточню еволюційне рівняння пластичності з урахуванням ізотропного зміцнення і нагріву для двофазних сталей можна записати:

$$R(\varepsilon, T_H) = [\beta_1 - \beta_2(T_H - T_0)K \cdot (\varepsilon)^n + (1 - \beta_1 - \beta_2(T_H - T_0))\sigma_0(1 - A \cdot e^{-B\varepsilon})][1 - \beta_3(T_H - T_0)]. \quad (9)$$

Емпіричні коефіцієнти моделі отримані методом найменших квадратів і представлені в таблиці 1.

Таблиця 1

Коефіцієнти емпіричної моделі

Сталь	K, n	V	A	B	$\beta_1$ $\beta_2$	$\beta_3$	$R^2$ $\sqrt{D}$ , МПа
DP780	1655 0,213	752,1	0,265	30,31	0,507 0,00187	$5,8 \cdot 10^{-4}$	0,998 2,5

Дослідження лонжеронів, що відновлюються. Для оцінки можливості відновлення лонжеронів автомобіля, виготовлених з двофазної сталі, методами витяжки з нагріванням, був проведений експеримент з використанням кінцево-елементної моделі лонжерона в середовищі ABAQUS6.11-3 Standard. Властивості матеріалу лонжерона розраховувалися відповідно до процедури UMAT. Для обміну даними з передпроцесором ABAQUS через інтерфейс UMAT була розроблена програма, що дозволяє за допомогою файлу INPUT FILE та команди \*USER MATERIAL вводити в обчислювальне ядро властивості матеріалу.

Матеріалом деталі була обрана двофазна сталь DP780 товщиною 1,5 мм. Вигнута форма лонжерона використовувалася для отримання деформацій, типових для виконання ремонту витяжкою на рихтувальних стапелях. На першому етапі випробувань новий лонжерон був деформований ударом масою 500 кг в осьовому напрямку зі швидкістю 16 м/с (рис. 2).

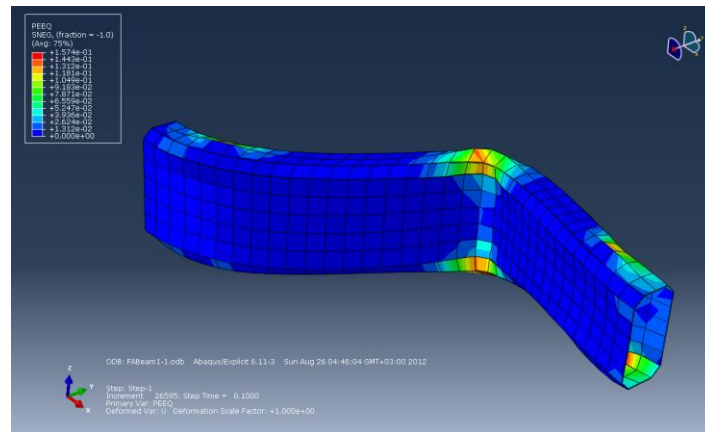


Рис. 2 Форма лонжерона після зіткнення

Результат деформації нового лонжерона (рис. 2) демонструє типові пошкодження при фронтальному ударі. Лонжерон втратив стійкість і зігнувся біля основи (біля місця закріплення), на початку (місце докладання сил) і найбільша деформація спостерігається в середині (місце найбільших значень сил). Енергія деформації склала 10,5 кДж.

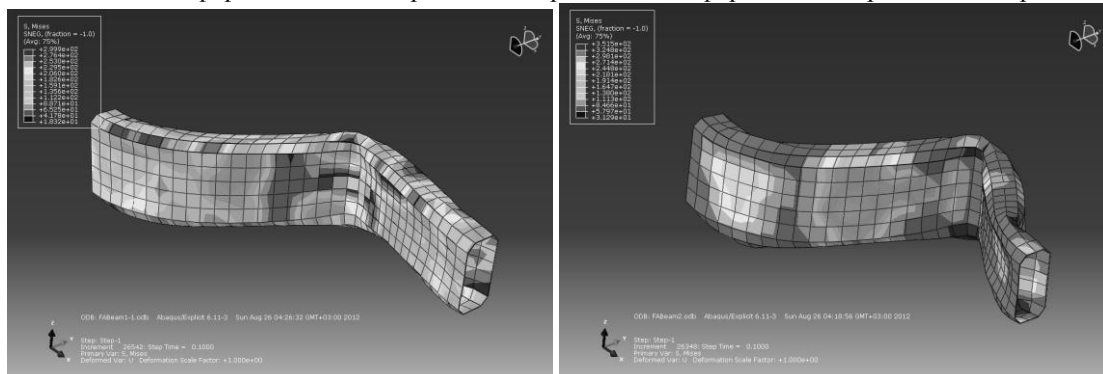
На другому етапі випробувань деформований лонжерон (рис. 2) був підданий розтягуючому ремонтному навантаженню. Для цього дані вихідного файлу (OUTPUT FILE) розв'язувача ABAQUS були експортовані у вихідний файл (INPUT FILE), що дозволило перенести інформацію про накопичену деформацію кожного елемента. Потім для компенсації деформаційного зміцнення і зрівнювання характеристик міцності всіх елементів, деформовані елементи були нагріті для зменшення їх межі пластичності до значень недеформованого металу. Температура нагріву кожного деформованого елемента розраховувалася індивідуально залежно від ступеня його деформації відповідно до (9).

Підставляючи значення накопиченої пластичної деформації визначаємо величину необхідного нагріву для кожного кінцевого елемента. Призначаючи кожному з елементів температуру нагрівання, добиваємося однакового значення пластичності для всіх елементів деталі.

В результаті витяжки такого роду в складі лонжерона частина елементів, які до цього мали деформацію, матимуть деградацію властивостей пластичності, виражену у вигляді зменшення кривої зміцнення. Величина деградації буде тим більша, чим більша була ступінь пластичної деформації і буде обчислюватися відповідно до (1).

Для порівняння впливу неоптимальних режимів ремонту на поведінку сталей, такий же деформований лонжерон був значно перегрітий для здійснення витяжки. Весь лонжерон був нагрітий до температури 700 °С. Оптимально нагрітий і перегрітий лонжерони при витяжці продемонстрували однакову геометричну форму, повністю відновивши початкову геометрію.

На наступному етапі оптимально нагрітий і перегрітий лонжерони були знову деформовані тією ж масою і на тій же швидкості, що і новий лонжерон (рис. 2). Результати зіткнення (рис. 3) обох деталей демонструють збільшення деформації, порівняно з новим лонжероном. У зв'язку з методикою проведення експерименту враховувалися всі деформації протягом трьох дослідів, тому обидві деталі мають значно більшу кількість елементів зі зміненими властивостями, це видно по фарбуванню деформованих деталей. Деталь, відремонтована з мінімальним нагріванням (рис. 3, а), демонструє невеликі відхилення форми від нового зразка із зосередженою деформацією всередині лонжерона.



а)

б)

Рис. 3. а – Деформація мінімально нагрітого лонжерона після повторного удару;  
б – деформація перегрітого при ремонті лонжерона після повторного удару

Перегріта деталь (рис. 3, б) має виражену значну деформацію по всій довжині лонжерона. Відмінності у формі деталі помітні при простій візуальній оцінці. Це підтверджує графік зростання деформації лонжеронів під дією навантаження (рис. 4, а). Новий лонжерон завершив пластичну деформацію до 0,06 мс і далі відбувається пружна розвантаження. Мінімально нагрітий лонжерон закінчив поглинання енергії до 0,08 мс, в той час як перегріта при ремонті деталь продовжує деформуватися до 0,1 секунди, не демонструючи пружну розвантаження.

Порівняння графіків поглинутої енергії зіткнення дозволяє провести кількісне порівняння змін експлуатаційних властивостей у результаті ремонтних впливів (рис. 4, б).

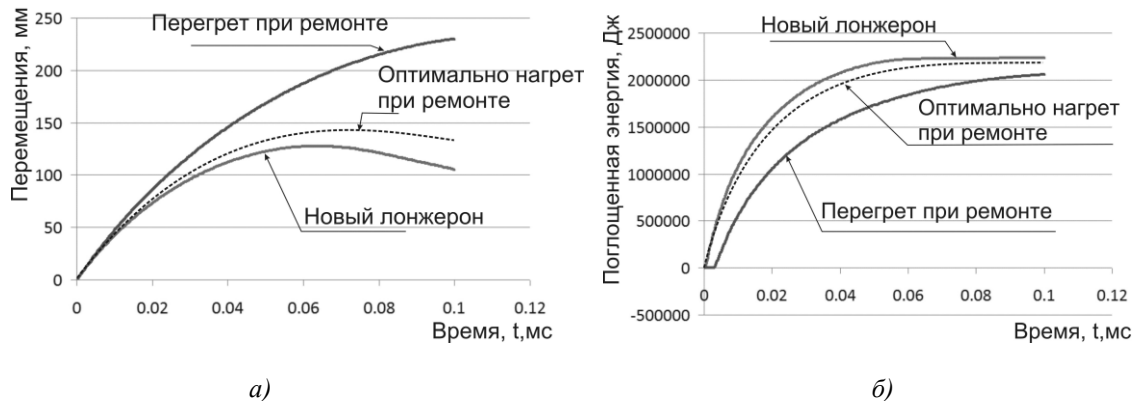


Рис. 4. а – графік переміщень лонжеронів при ударі;  
б – графік поглинання енергії зіткнення лонжеронами при деформації

**Висновки.** Експеримент демонструє, що ремонт, виконаний методом витяжки «на гарячому» може забезпечити пасивну безпеку кузова автомобіля виготовленого з термооброблених сталей при фронтальному ударі. Зменшення поглиненої енергії спостерігалось на 3 %, порівняно з новою деталлю. У той же час неконтрольований нагрів деталей при ремонті може призвести до значного 18 % падіння поглинання енергії та зростання залишкових деформацій на 100 %, що неприпустимо для деталей, які забезпечують пасивну безпеку кузова.

Дослідження показали, що існує можливість відновлення властивостей пасивної безпеки деталей з термооброблених сталей, однак технологія відновлення і температурні режими повинні бути розроблені з урахуванням еволюційних рівнянь (1)–(10). При виконанні ремонту повинен здійснюватися контроль температури нагрівання суворо відповідно до розрахункових режимів. Суворе дотримання технології дозволить значно скоротити витрати на ремонт сучасних кузовів за рахунок відновлення, раніше замінних деталей.

#### Список використаної літератури:

1. Фалалеев А.П. Влияние ремонтных нагревов на свойства автомобильной двухфазной стали / А.П. Фалалеев // Вісник СевНТУ / Механіка, енергетика, екологія : зб. наук. пр. – Севастополь, 2012. – Вып. 133. – С. 174–178.
2. Фалалеев А.П. Влияние температурных режимов кузовного ремонта на эволюцию механических свойств двухфазных автомобильных сталей / А.П. Фалалеев // Вісті Автомобільно-дорожнього інституту ДонНТУ : наук.-виробн. зб. – Донецьк, 2012. – Вып. 12. – С. 64–67.
3. Фалалеев А.П. Влияние температуры и пластической деформации на эволюцию механических свойств двухфазных автомобильных сталей / А.П. Фалалеев // Вісник Чернігівського державного технологічного університету / Технічні науки : зб. наук. пр. – Чернігів, 2012. – № 4 (51). – С. 104–107.
4. Continuous, large strain, tension/compression testing of sheet material / R.K. Boger, R.H. Wagoner, F. Barlat and ol. // International Journal of Plasticity 21. – 2005. – Pp. 2319–2343.
5. Hollomon J.H. Tensile deformation / J.H. Hollomon // Transactions of AIME, 162. – 1945. – Pp. 268–290.

6. *Voce E.* The relationship between stress and strain for homogeneous deformation / *E.Voce* // Journal of the Institute Metals, 74. – 1948. – Pp. 537–562.

ФАЛАЛЕЄВ Андрій Павлович – кандидат технічних наук, доцент кафедри автомобільного транспорту Севастопольського національного технічного університету.

Наукові інтереси:

- технічна експлуатація та ремонт автомобілів;
- забезпечення пасивної безпеки автомобілів протягом усього терміну експлуатації;
- використання CAD/CAM технологій на транспорті.

Тел.: (0692)43–50–02; (моб.): (050)747–95–99.

Факс: (0692)24–35–90.

E-mail: [a\\_falaleev@mail.ru](mailto:a_falaleev@mail.ru)

Стаття надійшла до редакції 27.08.2012

**Фалалєєв А.П.** Відновлюваність автомобільних кузовів із двофазних сталей при застосуванні ремонтних нагрівів

**Фалалеев А.П.** Восстанавливаемость автомобильных кузовов из двухфазных сталей при использовании ремонтных нагревов

**Falaleev A.P.** Repairability of dual phase car body using heating

УДК 629.113.011

**Восстанавливаемость автомобильных кузовов из двухфазных сталей при использовании ремонтных нагревов / А.П. Фалалеев**

Исследована возможность восстановления кузовных деталей из двухфазной стали методом вытяжки с нагревом. Показано, что существует возможность сохранения свойств пассивной безопасности при использовании локальных контролируемых нагревов до температур, обеспечивающих равномерность пластичности в зоне выполнения вытяжки. Экспериментально получена модель поведения нагретой двухфазной стали DP780, найдены коэффициенты эмпирической зависимости.

УДК 629.113.011

**Repairability of dual phase car body using heating / A.P. Falaleev**

Repairability of dual phase car body using heating was investigated. It is shown that there is an ability to safe passive safety properties by using local till the temperatures that guaranties the equal plasticity in the region of repairing. An experimental model of heated dual phase steel DP780 behavior was found, including coefficients of empirical equation.