

УДК 629.113.011

А.П. Фалалеев, доцент, канд. техн. наук*Севастопольский национальный технический университет,**ул. Университетская 33, г. Севастополь, Украина, 99053**a_falaleev@mail.ru***МОДЕЛИРОВАНИЕ НЕЛИНЕЙНОГО ПОВЕДЕНИЯ ДВУХФАЗНЫХ АВТОМОБИЛЬНЫХ СТАЛЕЙ ПРИ РАЗГРУЗКЕ**

Разработана модель поведения двухфазной стали DP780 при разгрузке-загрузке и пластическом деформировании. Модель основана на двухповерхностной теории течения материала и включает кинематическое и изотропное упрочнения, нелинейное поведение стали в области упругих деформаций. Модель может быть использована для расчета сложнонапряженного состояния деталей в задачах технической экспертизы, пассивной безопасности.

Ключевые слова: двухфазная сталь, кинематическое упрочнение, изотропное упрочнение, нелинейная упругая деформация.

Двухфазные стали активно используются в современной автомобильной промышленности для несущих деталей, отвечающих за пассивную безопасность благодаря свойствам рассеивать энергию столкновения за счет большой работы, расходуемой на деформационное упрочнение. Это позволило значительно снизить вес автомобиля, обеспечив более высокий уровень безопасности. Сложностью моделирования упруго-пластического поведения подобных сталей на этапах производства, во время столкновения и во время ремонтных операций обусловлена тем, что прочностные характеристики являются функционалом всех предыдущих деформаций и температурных воздействий, начиная с момента производства. Технологическая память двухфазной стали создает предпосылки для анизотропного поведения детали, изготовленной изначально из изотропного материала.

Точное моделирование изменений модуля упругости и эффекта Баушингера является сложной задачей при учете пластических деформаций кузова автомобиля при ДТП и последующем ремонте.

Модуль Юнга определяет поведение материала при разгрузке, последние исследования свидетельствуют о том, что использование постоянного, линейного модуля вносит существенную погрешность при прогнозировании свойств материала при разгрузке после больших пластических деформаций [1], [2].

Нелинейное поведение сталей при снятии разгрузки наблюдается фактически у всех сталей [3]. Изменение модуля упругости при разгрузке может достигать 22% для высокопрочных сталей и зависит от типа и состава стали. Для двухфазных сталей будет наблюдаться наибольшее смещение кривой прочности от первоначальной линейной из-за большого содержания мартенситной фазы. Нелинейное поведение объяснялось остаточными напряжениями, развитием микротрещин, накоплением и релаксацией дислокаций. В работе [3] нелинейность определена, как упругость второго порядка и описывается

$$\varepsilon = \frac{\sigma}{E_0} + \delta \left(\frac{\sigma}{E_0} \right)^2, \quad (1)$$

где σ – напряжения, возникающие в образце, ε – удлинение, E_0 – стандартный модуль упругости,

δ – нелинейный параметр. В соответствии с (1) для стали DP 780 изменение модуля должно составить около 3%.

Для экспериментальной оценки значений исследовались образцы стали DP780 соответствующей стандарту Mazda MES MM 106G SPCN 780Y длиной 75 мм и шириной 12,5 мм согласно стандарта ASTM-E646 на скорости 10^{-3} , 1/с на универсальной разрывной машине MTS 810. удлинение фиксировалось лазерным экстензометром LE-05. График растяжения двухфазной стали представлен на рисунке 1.

Двухфазная сталь обеспечила предел прочности 840 МПа и предел текучести 470 МПа. Отношение предела текучести к пределу прочности составило 0,56. При этом максимальное эффективное удлинение 9,8%. График (рисунок 1) отчетливо демонстрирует петлю при снятии нагрузки и вторичной загрузке.

Изменение модуля упругости традиционно учитывают вычислением наклона хорды (рисунок 2) от точки уменьшения нагрузки С и до точки полной разгрузки D. Такой подход удобно использовать в расчетах одномерных деформаций, изменяя модуль упругости при нагрузке и разгрузке. Для сложных реальных деформаций остаются участки детали, где остаточные напряжения не позволяют произойти полной разгрузке.

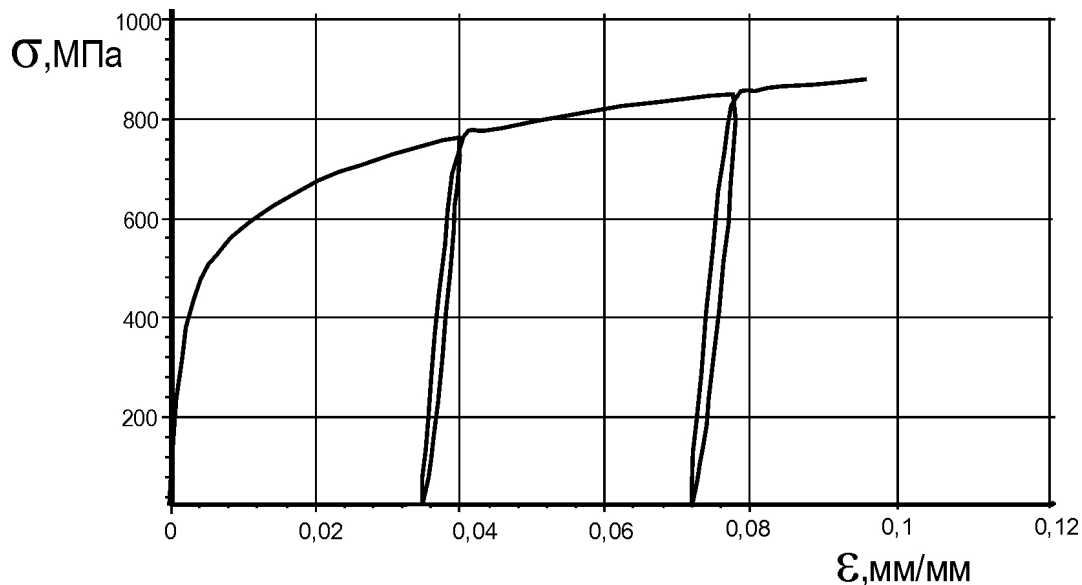


Рисунок 1 – Циклы загрузки-разгрузки при растяжении стали DP780

В этих местах модель будет заведомо иметь погрешности. На графике (рисунок 2) отчетливо видна зона линейных упругих деформаций при разгрузке (C-B) и при повторной загрузке (D-A). На этих участках материал подчиняется закону Гука с модулями упругости E_1 и E_2 соответственно. Для стали DP 780 они оба равны стандартному модулю упругости 208 ГПа. Использование метода «хорды», участок D-C, демонстрирует значение модуля $E_3 = 145$ ГПа. Точное значение модуля упругости существенно влияет на точность экспертизы ДТП при определении реальной зоны упругих деформаций и зоны поглощения энергии при столкновении. Нелинейная упругая деформация протекает с рассеянием энергии, хотя не демонстрирует остаточных деформаций при разгрузке.

В соответствии с [4], дислокации двигаются до достижения границ зерен или препятствий. Это создает нагромождение дислокаций в виде простейших дислокационных структур. После снятия напряжений дислокации расходятся друг от друга, обеспечивая дополнительную деформацию материала, которая складывается с обратной упругой линейной деформацией.

Последнее время для описания поведения двухфазных сталей в сложнагруженных условиях широко стала использоваться нелинейная кинематическая модель упрочнения Шабоса. Такой подход совмещает изотропную и нелинейную модели упрочнения, которые учитывают эффект Баушингера при нагружении в обратном направлении.

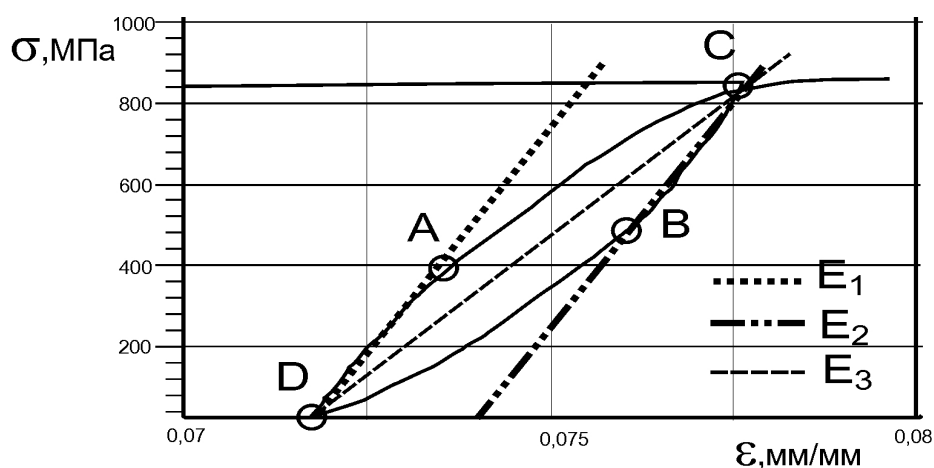


Рисунок 2 – Цикл загрузки-разгрузки двухфазной стали DP 780

Анализируя экспериментальное поведение двухфазной стали DP 780 в месте сжатия-растяжения (рисунок 2), в фазе растяжения можно выделить следующие элементы: эффект Баушингера, переходное упрочнение вблизи начала пластичности и постоянное разупрочнение.

В изначально изотропном и однородном материале за счет накопления деформаций может возникать анизотропия. Полагается, что в пространстве составляющих тензора напряжений существуют поверхность предела пропорциональности f и поверхность течения материала F . Внутри пропорциональной поверхности f материал ведет себя линейно-упруго и подчиняется закону Гука. За границей поверхности течения F материал ведет себя пластично. Расстояние между поверхностью течения и пропорциональной поверхностью является непрерывной функцией и в зависимости от функции может описывать нелинейное поведение упругой деформации или изменение модуля упругости.

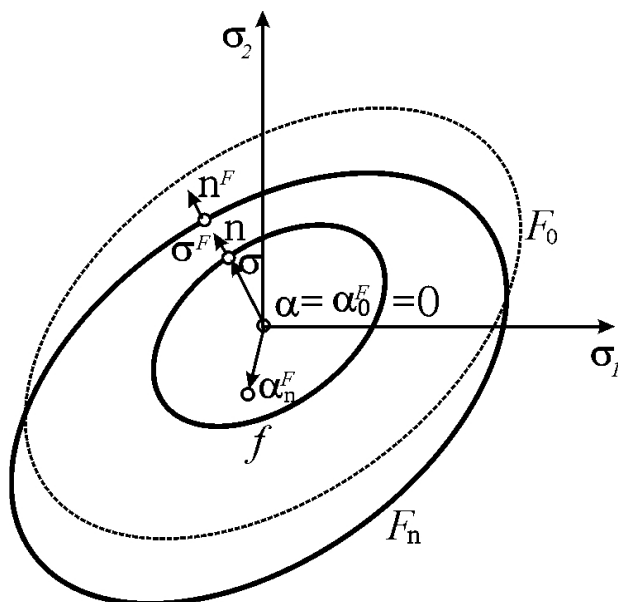


Рисунок 3 – Графическая интерпретация двухповерхностной теории течения материала

На рисунке 3 представлено поведение поверхностей f , определяющей упругое состояние и F , определяющей пластичное состояние (для двухмерного случая, $\sigma_3 = 0$).

Поверхности f и F могут быть описаны уравнениями:

$$f = \varphi(\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\alpha}) - r(\epsilon^P) = 0, \quad (2)$$

$$F = \Phi(\boldsymbol{\sigma}^F - \boldsymbol{\alpha}^F) - R(\epsilon^P, \dot{\epsilon}^P, T) = 0, \quad (3)$$

где r и R – определяют размеры поверхностей f и F , соответственно, центры которых описываются тензорами остаточных микронапряжений $\boldsymbol{\alpha}$ и $\boldsymbol{\alpha}^F$ соответственно; ϵ^P – эквивалентная пластическая деформация; $\dot{\epsilon}^P, T$ – скорость пластической деформации и температура нагрева детали, соответственно. Размеры поверхностей r и R определяются экспериментально исходя из диаграммы одноосного растяжения металла. Изменение размера поверхностей f и F описываются эволюционными уравнениями. Металл кузова автомобиля претерпевает на протяжении жизни множество деформаций, включая производство, аварии, ремонт, нагрев, сварку. Все эти технологические воздействия остаются в памяти двухфазной стали и существенно влияют на дальнейшее поведение. Простейший закон изотропного упрочнения, предложенный Холомоном [6] не может учесть влияние технологий ремонта кузова, но для выполнения экспертизы ДТП или холодной ремонтной правки он может быть использован с небольшими допущениями.

$$R = K(\epsilon^P)^n, \quad (4)$$

K и n – постоянные, определяемые методом наименьших квадратов для описания кривой $\delta - \epsilon$, полученной при растяжении.

Эволюционные уравнения зеркально отображают друг друга с учетом собственных постоянных. Основным допущением можно считать, что f меньше F и имеет ту же форму, соответственно f имеет во всех точках большую кривизну, это допущение необходимо для того, чтобы быть уверенными, что f никогда не пересечет F . Изменение размера поверхностей представляет собой изотропное упрочнение, вызванное накоплением деформации, или разупрочнение, связанное с влиянием технологической температуры при вытяжке и(или) низких скоростей вытяжки, близких к условиям ползучести стали.

При начальной упругой деформации $\boldsymbol{\varepsilon}^e$ тензор напряжений $\boldsymbol{\sigma}$ находится внутри или на границе поверхности f , причем вектор приращений напряжений $d\boldsymbol{\sigma}$ направлен внутрь поверхности, тогда угол между вектором приращения напряжений $d\boldsymbol{\sigma}$ и нормалью $d\mathbf{n}$ к поверхности f должен быть острым, а их скалярное произведение меньше нуля, т.е. $d\boldsymbol{\sigma} :: d\mathbf{n} < 0$.

Размеры и центры поверхностей f и F не меняются во время упругой деформации, которая подчиняется классическим линейным принципам:

$$d\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C}_0 : d\boldsymbol{\varepsilon}^e, \quad (5)$$

где $\mathbf{C}_0$ – постоянный тензор модулей упругости, демонстрирующий растяжение атомных связей.

Уравнение (5) определяет $d\boldsymbol{\varepsilon}^e$ в любом состоянии материала (пластическое течение, упруго-нелинейная или упругая деформация). При достижении тензора напряжений $\boldsymbol{\sigma}$ границы поверхности f центр поверхности $\mathbf{a}$ начинает смещаться вместе с поверхностью в сторону роста напряжений. В этот момент происходит упруго-нелинейная деформация $\boldsymbol{\varepsilon}^{ne}$. Для идентификации этого состояния должны одновременно выполняться три основных условия:

- тензор напряжений $\boldsymbol{\sigma}$ должен находиться на поверхности f ;
- вектор приращения тензора $d\boldsymbol{\sigma}$ должен быть направлен наружу, $d\boldsymbol{\sigma} :: d\mathbf{n} < 0$;
- поверхности f и F не должны находиться в контакте.

Во время упруго-нелинейной деформации размер и расположение F не меняются. Размер f постоянен, но поверхность смещается. В отличие от чистой упругой деформации в этом состоянии происходит некоторое рассеяние энергии, этим оно схоже с пластической, хотя при снятии нагрузки остаточной деформации не обнаруживается. Наблюдаемая на диаграмме петля гистерезиса обусловлена данным видом деформации. Смещение f во время упруго-нелинейной деформации подчиняется законам двухповерхностной модели течения материала для того, что бы обеспечить к моменту наступления пластичности (касание поверхностей) совпадение тензоров $\boldsymbol{\sigma}$ и $\boldsymbol{\sigma}^F$, а также равенство нормалей $\mathbf{n}$ и $\mathbf{n}^F$ в этих точках поверхностей.

$$\mathbf{n} = \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}} / \left\| \frac{\partial f}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \right\|, \quad \mathbf{n}^F = \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} / \left\| \frac{\partial F}{\partial \boldsymbol{\sigma}} \right\|, \quad (6)$$

где $\|\cdot\|$ – норма вектора или тензора.

Для обеспечения этого должны выполняться следующие законы трансляции поверхности:

$$d\mathbf{a} = d\mu(\boldsymbol{\sigma}^F - \boldsymbol{\sigma}), \quad (7)$$

$$\frac{\boldsymbol{\sigma} - \mathbf{a}}{r} = \frac{\boldsymbol{\sigma}^F - \mathbf{a}^F}{R}, \quad (8)$$

При условии того, что размеры поверхности остаются неизменными, т.е. $df = 0$, закон (7) можно записать в виде:

$$d\mathbf{a} = \frac{\langle \mathbf{n} : d\boldsymbol{\sigma} \rangle}{\mathbf{n} : (\boldsymbol{\sigma}^F - \boldsymbol{\sigma})} (\boldsymbol{\sigma}^F - \boldsymbol{\sigma}), \quad (9)$$

где угловые скобки $\langle \cdot \rangle$ демонстрируют, что $\langle \mathbf{n} : d\boldsymbol{\sigma} \rangle = 0$ если $\mathbf{n} : d\boldsymbol{\sigma} \leq 0$, иначе $\langle \mathbf{n} : d\boldsymbol{\sigma} \rangle = \mathbf{n} : d\boldsymbol{\sigma}$.

Соотношение между приращением напряжений и приращением общей деформации можно записать в следующем виде

$$d\boldsymbol{\sigma} = \mathbf{C}_0 : d\boldsymbol{\varepsilon}^e = \mathbf{C} : d\boldsymbol{\varepsilon}, \quad (10)$$

$$d\boldsymbol{\varepsilon} = d\boldsymbol{\varepsilon}^e + d\boldsymbol{\varepsilon}^{ne}, \quad (11)$$

$$\frac{d\boldsymbol{\varepsilon}^e}{\|d\boldsymbol{\varepsilon}^e\|} = \frac{d\boldsymbol{\varepsilon}^{ne}}{\|d\boldsymbol{\varepsilon}^{ne}\|}, \quad (12)$$

где $\mathbf{C}$ – функция тензора линейной и нелинейной упругости, который отражает изменение модуля Юнга E , представляющая наклон кривой одноосного нагружения в координатах $\boldsymbol{\sigma} - \boldsymbol{\varepsilon}$.

$$E = E_0 - E_1 \left[1 - \exp \left(-b \int \|d\boldsymbol{\varepsilon} - d\boldsymbol{\varepsilon}^p\| \right) \right], \quad (13)$$

где интеграл оценивается от момента первого касания поверхности f изнутри и до текущего упруго-нелинейного состояния. E_0 – традиционный модуль упругости материала, E_1 и b – параметры, определяемые эмпирически.

Форма (13) определяет, что при переходе от упругой к нелинейно-упругой деформации модуль упругости будет принимать значение E_0 независимо от того с какой стороны будет двигаться тензор напряжений. Коэффициент Пуассона принимаем постоянным, поэтому $\mathbf{C}$ зависит только от $\mathbf{E}$.

Выражая тензор $\mathbf{C}$ в явном виде получим:

$$C_{ijkl} = \frac{\nu E}{(1+\nu)(1-2\nu)} \delta_{ij} \delta_{kl} + \frac{E}{(1+\nu)} (\delta_{ik} \delta_{jl} + \delta_{il} \delta_{jk}) = \left(\frac{E}{E_0} \right) C_{0ijkl}, \quad (14)$$

где δ_{ij} – символ Кронекера

$$\delta_{ij} = \begin{cases} 1, i = j \\ 0, i \neq j \end{cases}$$

C_{0ijkl} – компонент тензора $\mathbf{C}_0$ в прямоугольной системе координат. Отметим, что $\mathbf{C}$ параллелен $\mathbf{C}_0$, что обеспечивается параллельностью $d\mathbf{\epsilon}^e$ и $d\mathbf{\epsilon}^{ne}$ (12).

В явной форме приращение упруго-нелинейной деформации можно выразить из (7)

$$d\mathbf{\epsilon}^{ne} = (\mathbf{S} - \mathbf{S}_0) : d\mathbf{\sigma}, \quad (15)$$

где $\mathbf{S}$ и $\mathbf{S}_0$ – тензоры с компонентами обратными матрицам, представляющих тензоры $\mathbf{C}$ и $\mathbf{C}_0$.

При достижении внутренней поверхности f поверхности текучести F наступает пластическое состояние материала. Согласно условий трансляции поверхностей это касание происходит в точке конгруэнтной тензору напряжений $\mathbf{\sigma} = \mathbf{\sigma}^F$ и приращение тензора напряжений направлено наружу поверхности f , $d\mathbf{\sigma} :: d\mathbf{n} > 0$.

В этот момент присутствуют все три вида деформаций, описываемые данной теорией – пластическая деформация $\mathbf{\epsilon}^p$, упругая деформация $\mathbf{\epsilon}^e$ и нелинейно-упругая деформация $\mathbf{\epsilon}^{ne}$. В процессе деформации размеры f и F могут изменяться, в соответствии с эволюционными законами, которые отражают изотропное упрочнение и обеспечивая конгруэнтность тензоров $\mathbf{\sigma}$ и $\mathbf{\sigma}^F$. Определяющие соотношения для этого вида деформации можно записать следующим образом:

$$d\mathbf{\sigma} = \mathbf{C}_0 : d\mathbf{\epsilon}^e = \mathbf{C} : (d\mathbf{\epsilon} - d\mathbf{\epsilon}^p), \quad (16)$$

$$d\mathbf{\epsilon} = d\mathbf{\epsilon}^e + d\mathbf{\epsilon}^{ne} + d\mathbf{\epsilon}^p, \quad (17)$$

$$\frac{d\mathbf{\epsilon}^e}{\|d\mathbf{\epsilon}^e\|} = \frac{d\mathbf{\epsilon}^{ne}}{\|d\mathbf{\epsilon}^{ne}\|}, \quad (18)$$

При пассивной разгрузке поверхность пропорциональности f перемещается на величину $\mathbf{a}$ назад под воздействием напряжений, вызывавших упруго-нелинейную деформацию, а затем упругая деформация $\mathbf{\epsilon}^e$ возвращается в ноль. Таким образом, центр поверхности f возвращается в исходное положение, а наружная поверхность течения F остается смещенной на величину тензора остаточных микронапряжений $\mathbf{a}^F$. При повторном активном пластическом деформировании материал уже не является изотропным, т.к. наблюдается асимметрия расположения внутренней и наружной поверхностей. Благодаря тензору статочных микронапряжений моделируется кинематическое упрочнение, известное как эффект Баушингера. Кинематическое, как и изотропное упрочнения носят выраженный характер у современных автомобильных сталей, в связи с необходимостью поглощать большое количество энергии при деформации. Тензор остаточных микронапряжений $\mathbf{a}^F$ состоит из нелинейной составляющей $\mathbf{a}_1^F$, предложенной в классической модели Шабоса, которая описывает переходное поведение материала и линейной составляющей $\mathbf{a}_2^F$, описывающей постоянное разупрочнение при активном деформировании.

$$\mathbf{a}^F = \mathbf{a}_1^F + \mathbf{a}_2^F, \quad (19)$$

$$d\mathbf{a}_1^F = \frac{2}{3} C_1 d\mathbf{\epsilon}^p - \gamma \mathbf{a}_1^F d\bar{\mathbf{\epsilon}}^p, \quad (20)$$

$$d\mathbf{a}_2^F = \frac{2}{3} C_2 d\mathbf{\epsilon}^p, \quad (21)$$

$d\bar{\mathbf{\epsilon}}^p$ – приращение эквивалентной пластической деформации определяется по критерию фон Мизеса

$$d\bar{\mathbf{\epsilon}}^p = \left(\frac{2}{3} d\mathbf{\epsilon}^p : d\mathbf{\epsilon}^p \right)^{1/2}. \quad (22)$$

Отметим, что для начальной растягивающей нагрузки недеформированного материала α и α^F будут равны нулю. r будет представлять предел пропорциональности (упруго – нелинейный переход), R – предел текучести (пластический переход). Это означает, что f будет значительно меньше F , это избавляет от проблем взаимного геометрического пересечения двух поверхностей. При анализе больших деформаций возможно влияние поворота жесткого тела, которое может привести к погрешности в расчетах, поэтому все напряжения должны соответствующим образом пересчитываться с учетом поворота базиса.

На основе графика одноосного растяжения (рисунок 1) определяем значения коэффициентов модели (таблица 1). Подбор коэффициентов осуществляется методом наименьших квадратов.

Таблица 1 – Эмпирические коэффициенты модели для стали DP780

K МПа	n	b	ν	E_0 МПа	C_1 МПа	C_2 МПа	E_1 МПа	γ
1080	0,14	645	0,71	208000	17062	1270	117500	72

Среднее отношение линейной деформации к нелинейной $\frac{\epsilon^{ne}}{\epsilon^e}$ во всех экспериментах оставалось равным 0.35 независимо от напряжений, при которых происходила разгрузка-загрузка. Полученная модель описывает поведение стали с высокой точностью (5%), что обусловлено использованием феноменологического подхода.

Во время нелинейной упругой деформации происходит рассеяние энергии, величина которой определяется напряжениями и деформациями. Для двух экспериментальных точек загрузки-разгрузки она составила $0,61 \cdot 10^6$ Дж/м³ (при 750 МПа) и $0,69 \cdot 10^6$ Дж/м³ (при 820 МПа) соответственно. Это дает возможность предполагать о линейной зависимости количества рассеянной энергии от напряжения разгрузки-загрузки.

Предложенная модель описывает поведение двухфазной стали DP780 при эксплуатационных и ремонтных деформированиях. Модель основана на двухповерхностной теории пластичности материала и учитывает кинематическое упрочнение (закон Баушингера), изотропное деформационное упрочнение, зону непропорциональных упругих деформаций перед наступлением пластичности.

Для описания поведения материала была использована модель изотропно-кинематического упрочнения материала. Работа упрочнения достигается за счет изотропного упрочнения, которое ассоциируется с формированием устойчивых дислокационных структур, таких как клеточные стенки. Модель включает элементы кинематического упрочнения для учета эффекта Баушингера. Переходное поведение, которое обычно происходит за счет движения устойчивых дислокаций, учтено нелинейной моделью упрочнения Шабоса. Применение современного высокоточного оборудования позволило исследовать нелинейную зону упругих деформаций и существенно повысить точность моделирования остаточных деформаций и рассеяния энергии при столкновениях и последующих ремонтах.

Нелинейность проявлялась во всех экспериментах и нашла отражение в модели. Эмпирические коэффициенты, приведенные в таблице 1 дают возможность использовать модель для численных расчетов в программных пакетах численного расчета конструкций методом конечных элементов, путем описания свойств материала с помощью стандартных процедур. Использование реальной модели сможет существенно повысить точность экспертизы ДТП и определения пассивной безопасности кузова после восстановительного ремонта.

Библиографический список использованной литературы

1. Cleveland R.M. Inelastic effects on springback in metals / R.M. Cleveland, A.K. Ghosh. // International Journal of Plasticity. — 2002. — № 18. — P. 769–785.
2. Perez R. Study of the inelastic response of TRIP steels after plastic deformation / R. Perez, S.A. Benito, J.M. Prado // ISIJ International. — 2005. — № 45. — P. 1925–1933.
3. Yu H.Y. Variation of elastic modulus during plastic deformation and its influence on springback / H.Y. Yu // Materials and Design. — 2009. — № 30. — P. 846–850.
4. Hirth J.P. Theory of dislocations / J.P. Hirth, J. Lothe // A Wiley. — Interscience Publication JOHN WILEY & SONS, New York, Chichester, Brisbane, Toronto, Singapore, 1982. — 320 p.

Поступила в редакцию 20.04.2012 г.

Фалалесв А.П. Моделювання нелінійної поведінки двофазних автомобільних сталей щодо розвантажування

Розроблена модель поведінки двофазної сталі DP780 щодо розвантаженні-завантаженні та пластичному деформуванні. Модель збудована на засаді двоповерхневої теорії плинності матеріалу та включає кінематичне та ізотропне зміцнення, нелінійну поведінку сталі у зоні пружних деформацій. Модель може бути застосована щодо розрахунку складно навантаженого стану деталі у задачах технічної експертизи ДТП та пасивної безпеки.

Ключові слова: двофазна сталь, кінематичне зміцнення, ізотропне зміцнення, нелінійна пружна деформація.

Falaleev A.P. Nonlinear behavior modeling of dual phase automotive steels under unloading

A model of dual phase steel DP780 load-unload behavior was developed. The model is based on the two surface theory of plasticity and describes kinematic and isotropic hardening, nonlinear steel behavior in the area of elastic deformation. The model can be used for stressed state analysis of automobile parts behavior for solving the tasks of technical expertise and passive safety.

Keywords: dual phase steel, kinematic hardening, isotropic hardening, nonlinear deformation.