

УДК 629.113.011

Моделирование пластических деформаций двухфазных сталей кузовных элементов

А.П. Фалалеев

Разработана феноменологическая модель поведения двухфазной стали DP 780 при знакопеременных деформациях. Модель построена на основе двухповерхностной теории течения материала и учитывает кинематическое (эффект Баушингера) и изотропное упрочнения. Для моделирования изотропного упрочнения предложен комбинированный закон на основе уравнений Холломона и Хокет-Шерби. Модель в сочетании с методом конечных элементов позволяет оценить значение пассивной безопасности автомобилей после кузовного ремонта, а также повысить точность проведения экспертизы ДТП.

Ключевые слова: двухфазная сталь, двухповерхностная модель текучести, ремонт кузовов, эффект Баушингера.

Modeling of Dual Phase Steel Plastic Deformations of Car Body Repair

A.P. Falaleev

There was developed a phenomenological model of dual phase steel DP 780 behavior with accounting changing in deformation direction. The model was built based on a two surface theory of plasticity and takes into account the kinematic (Baushinger effect) and isotropic hardenings. There was proposed the combined Hollomon and Hokket-Sherby rule for a describing isotropic hardening. Using the finite element analysis the model allows to evaluate the repaired car body's passive safety and to increase the accuracy of an incident restoration.

Keywords: dual phase steel, two surface theory of plasticity, car body repair, Bauschinger effect.

Двухфазная сталь широко используется в современной автомобильной промышленности для несущих деталей, отвечающих за пассивную безопасность, благодаря свойствам рассеивать энергию столкновения за счет большой работы, расходуемой на деформационное упрочнение. Двухфазные стали демонстрируют хорошую пластичность наряду с высокой прочностью и высокой степенью упрочнения на начальных стадиях деформации, что позволяет изготавливать из нее детали методом холодной штамповки. Сложность моделирования упруго-пластического поведения подобных сталей на этапах производства, во время столкновения и ремонтных операций обусловлена тем, что прочностные характеристики являются функционалом всех предыдущих деформаций и температурных воздействий, начиная с момента производства. Технологическая память двухфазной стали



ФАЛАЛЕЕВ

Андрей Павлович

кандидат технических наук,
доцент

(Севастопольский
национальный технический
университет)

FALALEEV

Andrey Pavlovich

Cand. Sc. (Eng.),
Associate Professor

(Sevastopol, Ukraine, Sevastopol
National Technical University)

создает предпосылки для анизотропного поведения детали, изготовленной изначально из изотропного материала.

Для моделирования свойств двухфазных сталей наиболее широко применяется феноменологический подход. Для описания поведения широко используется нелинейная кинематическая модель упрочнения Шабоса [1]. Такой подход совмещает изотропную и нелинейную модели упрочнения, которые учитывают эффект Баушингера [2, 3]. Модуль Юнга определяет поведение материала при одноосной разгрузке. Ряд исследований свидетельствуют о том, что использование постоянного линейного модуля вносит заметную погрешность при прогнозировании свойств материала при разгрузке после больших пластических деформаций [4, 5].

Методика экспериментальных исследований. Механические свойства исследуемых образцов стали DP 780, соответствующие стандарту Mazda MES MM 106G SPCN 780Y, определялись на универсальной разрывной машине (табл. 1). Последнее число в обозначении стали, определяет предел прочности стали в мегапаскалях (МПа). Химический состав исследуемой стали DP780: 0,18C; 0,5Si; 2,0Mn; 0,025P; 0,8Cr; 0,015S.

Таблица 1

Механические свойства исследуемой автомобильной стали

Материал	Предел текучести, МПа	Предел прочности, МПа	Максимальное относительное удлинение, %
DP780	490	780	14

Диаграмма поведения двухфазных сталей представлена на рис. 1. Образцы стали предварительно сжимались до значения эффективной остаточной деформации 0,02 (участок А—В), затем нагрузка снималась (участок В—С), после этого образцы растягивались (участок С—G). Для наглядности на рис. 1 сжатие и растяжение отложены в первом положительном квадранте. Анализируя экспериментальное поведение исследуемой стали (см. рис. 1), в фазе растяжения можно выделить следующие элементы: эффект Баушингера (точка D), переходное упрочнение вблизи начала пластичности (точка E) и разупрочнение на участке (F—G).

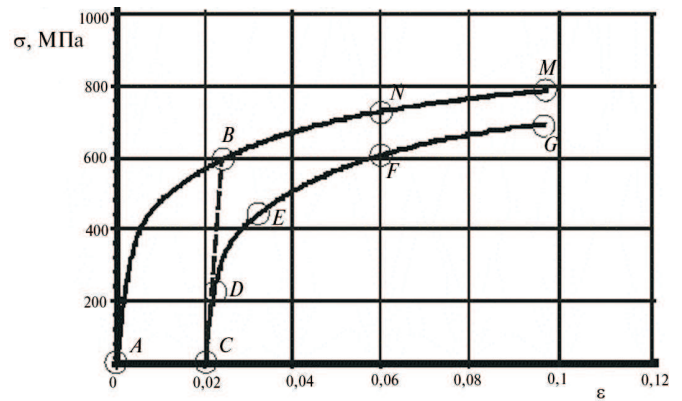


Рис. 1. Диаграмма сжатие-растяжение двухфазной стали DP 780

Для построения модели поведения такой стали предлагается использовать феноменологическую двухповерхностную теорию течения материала Шабоса [1].

Определяющие соотношения модели пластичности двухфазной стали. Согласно теории полагается что в пространстве тензора напряжений существуют поверхность упругости (предела пропорциональности) f и поверхность пластичности (предела текучести) материала F . Внутри поверхности f материал ведет себя линейно-упруго и подчиняется закону Гука. За пределами поверхности F материал ведет себя пластично. Расстояние между поверхностью пластичности и поверхностью упругости является непрерывной функцией, вид которой описывает нелинейную упругую деформацию, т. е. изменение модуля упругости.

На рисунке 2 представлено поведение поверхности f , представляющей упругое состояние, и поверхности F , определяющей пластичное состояние на плоскости главных компонент тензора напряжений (для двухмерного случая, $\sigma_3 = 0$).

Поверхности f и F могут быть описаны следующими уравнениями:

$$f = \varphi(\sigma - \alpha) - r(\epsilon^P, \dot{\epsilon}^P, T) = 0; \quad (1)$$

$$F = \Phi(\sigma^F - \alpha^F) - R(\epsilon^P, \dot{\epsilon}^P, T) = 0, \quad (2)$$

где r и R ограничивают размеры поверхностей f и F , соответственно, расположение центров которых, определяется тензорами остаточных микронапряжений α и α^F , соответственно; σ — текущее значение тензора напряжений; σ^F — значение

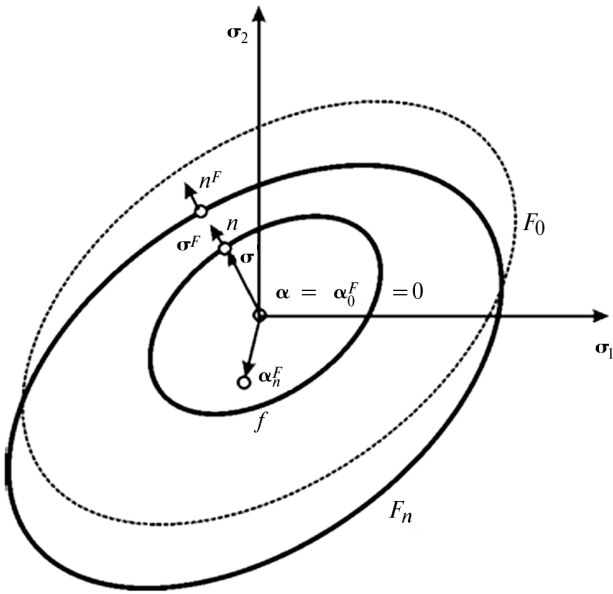


Рис. 2. Графическая интерпретация двухповерхностной модели пластичности материала

тензора напряжений при смещении поверхности F ; ϵ^P — тензор накопленной пластической деформации; $\dot{\epsilon}^P$ — скорость пластической деформации; T — температура нагрева стали.

Размеры и координаты центров поверхностей f и F не меняются во время упругой деформации. Определяющие соотношения, общие для всех видов деформаций в предлагаемой модели, можно записать следующим образом:

$$d\sigma = C_0 : d\epsilon^e = C : (d\epsilon - d\epsilon^P); \quad (3)$$

$$d\epsilon = d\epsilon^e + d\epsilon^{ne} + d\epsilon^P; \quad (4)$$

$$\frac{d\epsilon^e}{\|d\epsilon^e\|} = \frac{d\epsilon^{ne}}{\|d\epsilon^{ne}\|}, \quad (5)$$

где C_0 — постоянный тензор модулей упругости; C — функция тензора линейной и нелинейной упругости, которая отражает изменение модуля Юнга E и определяет наклон кривой в координатах $\sigma - \epsilon$ при одноосном нагружении. Уравнение (5) гарантирует коллинеарность тензоров ϵ^e и ϵ^{ne} .

При достижении тензором напряжений σ границы поверхности f центр поверхности α начинает смещаться вместе с поверхностью в сторону роста напряжений. Во время упруго-нелинейной деформации размер и располо-

жение F не меняются. Размер поверхности f постоянен, но сама поверхность смещается.

В явной форме приращение упруго-нелинейной деформации можно выразить из соотношения (3):

$$d\epsilon^{ne} = (S - S_0) : d\sigma, \quad (5)$$

где S и S_0 — тензоры с компонентами, обратными матрицам, представляющим тензоры C и C_0 .

Для условий холодной ремонтной вытяжки на малых скоростях деформации можно допустить, что в этой зоне продолжает действовать закон Гука с постоянным модулем упругости. Тогда изменением модуля упругости можно пренебречь при оценке экспериментальной диаграммы растяжения стали (см. рис. 1).

При достижении внутренней поверхностью f границ поверхности текучести F наступает пластическое состояние материала. Согласно условий трансляции поверхностей это касание происходит в точке, конгруэнтной тензору напряжений $\sigma = \sigma^F$ и приращение тензора напряжений направлено наружу от поверхности f , $d\sigma : dn > 0$. В этот момент действуют все три вида деформаций, описываемые данной теорией: пластическая деформация ϵ^P , упругая деформация ϵ^e и нелинейно-упругая деформация ϵ^{ne} .

В процессе деформирования размеры f и F могут изменяться, что отражает изотропное упрочнение материала [5].

При пассивной разгрузке поверхность предела пропорциональности f , смещенная на величину α под воздействием напряжений, вызвавших упруго-нелинейную деформацию, перемещается назад, а затем упругая деформация ϵ^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 α^F . При повторном активном нагружении материал уже не является изотропным, поскольку наблюдается асимметрия расположения внутренней и наружной поверхностей. Благодаря тензору остаточных микронапряжений моделируется кинематическое упрочнение, известное как эффект Бау-

шингера. И кинематическое и изотропное упрочнения носят выраженный характер в современных автомобильных сталях в связи с необходимостью поглощения больших количеств энергии при деформации. Тензор остаточных микронапряжений α^F описывается в соответствии с моделью Шабоса:

$$\alpha^F = \alpha_1^F + \alpha_2^F; \quad (6)$$

$$d\alpha_1^F = \frac{2}{3}C_1 d\epsilon^P - \gamma\alpha_1^F d\bar{\epsilon}^P; \quad (7)$$

$$d\alpha_2^F = \frac{2}{3}C_2 d\epsilon^P, \quad (8)$$

где $d\bar{\epsilon}^P$ — эквивалентное приращение пластической деформации,

$$d\bar{\epsilon}^P = \left(\frac{2}{3} d\epsilon^P : d\epsilon^P \right)^{1/2}. \quad (9)$$

Эволюция размеров поверхностей упругости и пластичности зависит от множества технологических факторов и является основной теоретической проблемой феноменологического подхода, так как она определяет момент наступления пластичности и реальное остаточное формоизменение. Размеры r и R поверхностей определяются экспериментально, исходя из диаграммы одноосного растяжения металла (см. рис. 1).

Моделирование упрочнения стали. При пластическом деформировании размеры поверхностей f и F представляют собой функционалы от эквивалентной пластической деформации, накопленной за время функционирования кузовного элемента автомобиля, скоростей деформирования, длительности и характера приложения температурного воздействия.

$$r = g(r_0, \epsilon^P, \dot{\epsilon}^P, T); R = G(R_0, \epsilon^P, \dot{\epsilon}^P, T), \quad (10)$$

где R_0, r_0 — пределы текучести и пропорциональности стали в момент поставки, которые

могут быть определены, соответственно, из диаграмм растяжения материала.

В простейшем случае функционал G , описывающий только изотропное деформационное упрочнение, принимает вид

$$R = G(R_0, \epsilon^P). \quad (11)$$

Для выбора описания кривой упрочнения выполнено сравнение адекватности моделирования экспериментальной диаграммы тремя наиболее известными законами, используемыми для описания упрочнения материала. Были использованы уравнения Людвига (12), Свифта (13) и Хокет-Шерби (14):

$$R = K(\epsilon^P)^n, \quad (12)$$

где n — коэффициент упрочнения; K — постоянная свойств материала;

$$R = C_3(\epsilon^P + A)^m, \quad (13)$$

где C_3, A, m — экспериментальные постоянные материала;

$$R = R_0 - (R_0 - B)\exp[-a(\epsilon^P)^\nu], \quad (14)$$

где R_0, B, a, ν — экспериментальные постоянные материала.

Эмпирические коэффициенты для моделирования поведения стали DP 780, полученные в результате обработки методом наименьших квадратов экспериментальных данных монотонного одноосного сжатия-растяжения и предлагаемый комбинированный фактор β представлены в табл. 2.

На рисунке 3 видно, что начальную фазу упрочнения материала все уравнения моделируют примерно одинаково хорошо, но при деформациях, больших 0,02, уравнение Хокет-Шерби (14) недооценивает напряжения, а два других уравнения — переоценивают, особенно уравнение Свифта (13). В то же время при больших деформациях все три уравнения

Таблица 2

Эмпирические коэффициенты моделей деформирования стали DP780

$K, \text{ МПа}$	n	β	$R_0, \text{ МПа}$	B	a	ν	A	m	$C_0, \text{ МПа}$	$C_1, \text{ МПа}$	$C_2, \text{ МПа}$	$C_3, \text{ МПа}$	γ
1080	0,14	0,6	790	300	-11,21	0,71	0,003	0,15	208000	17062	1270	1080	72

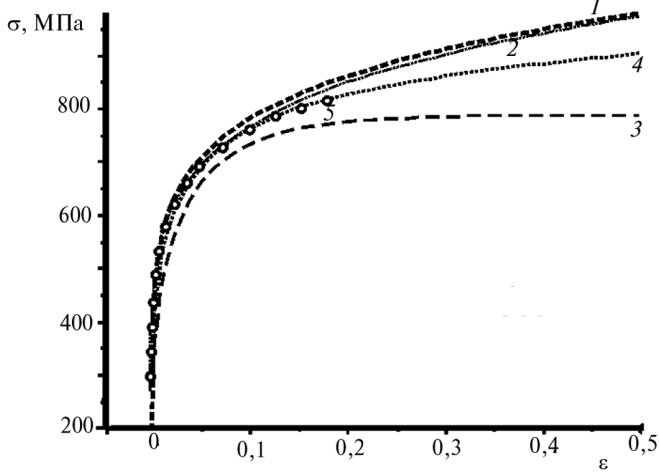


Рис. 3. Экспериментальная зависимость и результаты моделирования упрочнения стали DP 780:
 1 — уравнение Людвига; 2 — уравнение Свифта;
 3 — уравнение Хокет-Шерби;
 4 — комбинированное уравнение Свифта и Хокет-Шерби; 5 — экспериментальный график деформирования стали DP 780

моделируют поведение стали DP 780 неудовлетворительно. Комбинирование уравнений Людвига и Хокет-Шерби (см. рис. 3, кривая 4) демонстрирует наилучшее приближение, при аппроксимации в виде

$$R = \beta [K(\epsilon^p)^n] + (1 - \beta) [R_0 - (R_0 - B)\exp(-a(\epsilon^p)^v)], \quad (15)$$

где β — комбинирующий фактор.

Выводы

Предложена модель, описывающая поведение двухфазной стали DP 780, при эксплуатационном и ремонтном деформировании. Модель основана на двухповерхностной теории пластичности материала и учитывает кинематическое упрочнение, возможность существования зоны нелинейных упругих деформаций перед наступлением пластичности.

Проведено сравнение существующих законов для описания упрочнения. Наиболее точно поведение материала описывает предложенная модель, полученная в результате комбинирова-

ния законов Людвига и Хокет-Шерби. Комбинированный закон (15) более точно описывает поведение стали DP 780 в всем диапазоне деформаций. Следует отметить, что предложенные модели рассчитаны на использование во время ремонта кузова холодной вытяжки на традиционных скоростях деформации. В случае использования нагрева, изменения скоростей, введения в зону ремонта ультразвуковых или электромагнитных источников энергии, уравнения эволюции поверхностей пропорциональности и течения материала (10) должны быть изучены отдельно и обработаны в соответствии с экспериментальными данными.

Полученная модель может быть использована для моделирования поведения кузовных деталей автомобилей, изготовленных из двухфазных сталей DP 780 во время ДТП и на операциях кузовного ремонта. Сложность модели предопределена необходимостью учета всех пластических деформаций, которые выдержала сталь с момента изготовления детали. Использование модели для задания свойств материала при инженерном анализе методом конечных элементов в программных пакетах типа Ansys, Abaqus позволяет существенно повысить точность моделирования, что крайне важно на этапах экспертизы ДТП и предсказания пассивной безопасности кузовов после ремонта.

Литература

1. Chaboche J.L. Constitutive-Equations for Cyclic Plasticity and Cyclic Viscoplasticity // International Journal of Plasticity. 1989. N 5. P. 247—302.
2. Zang S.L., Guo C. A constitutive model for spring-back prediction in which the change of Young's modulus with plastic deformation is considered // International Journal of Machine Tools and Manufacturing. 2007. N 47. P. 1791—1797.
3. Eggertsen P.A., Mattiassou K. On the modeling of the bending-un bending behavior for accurate springback predictions // International Journal of Mechanical Sciences. N 51. 2009. P. 547—563.
4. Cleveland R.M., Ghosh A.K. Inelastic effects on springback in metals // International Journal of Plasticity. 2002. N 18. P. 769—785.
5. Perez R., Benito S.A., Prado J.M. Study of the inelastic response of TRIP steels after plastic deformation // Isij International. N 45. 2005. P. 1925—1933.

References

1. Chaboche J.L. Constitutive-Equations for Cyclic Plasticity and Cyclic Viscoplasticity. *International Journal of Plasticity*, 1989, no. 5, pp. 247—302.
2. Zang S.L., Guo C. A constitutive model for spring-back prediction in which the change of Young's modulus with plastic deformation is considered. *International Journal of Machine Tools and Manufacturing*, 2007, no. 47, pp. 1791—1797.
3. Eggertsen P.A., Mattiassou K. On the modeling of the bending-un bending behavior for accurate springback prediction. *International Journal of Mechanical Sciences*, 2009, no. 51, pp. 547—563.
4. Cleveland R.M., Ghosh A.K. Inelastic effects on springback in metals. *International Journal of Plasticity*, 2002, no. 18, pp. 769—785.
5. Perez R., Benito S.A., Prado J.M. Study of the inelastic response of TRIP steels after plastic deformation. *Isij International*, 2005, no. 45, pp. 1925—1933.

Статья поступила в редакцию 11.12.2012

Информация об авторе

ФАЛАЛЕЕВ Андрей Павлович (Севастополь) — кандидат технических наук, доцент кафедры «Автомобильный транспорт», проректор по научной работе. Севастопольский национальный технический университет (99053, Севастополь, Украина, ул. Университетская, 33, e-mail: a_falaleev@mail.ru).

Information about the authors

FALALEEV Andrey Pavlovich (Sevastopol) — Cand. Sc. (Eng.), Associate Professor of «Motor Transport» Department, Pro-rector for Research. Sevastopol National Technical University (99053, Universitetskaya Street 33, Sevastopol, Ukraine, e-mail: a_falaleev@mail.ru).