

УДК 629.113.011

А.П.Фалалеев

Севастопольский национальный технический университет

МОДЕЛИРОВАНИЕ ПОВЕДЕНИЯ ДВУХФАЗНЫХ СТАЛЕЙ НА ОПЕРАЦИЯХ ХОЛОДНОЙ РЕМОНТНОЙ ВЫТЯЖКИ КУЗОВОВ АВТОМОБИЛЕЙ

В работе 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 закон комбинированный на основе уравнения Холломона и Хокет-Шерби. Модель позволяет оценить методом конечных элементов 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.*

Введение

Двухфазная сталь активно 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 детали методом холодной штамповки. 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.

Наиболее распространенным инструментом, для моделирования свойств двухфазных сталей, стал феноменологический подход. Последнее время для описания поведения материала широко используются нелинейная кинематическая модель упрочнения Шабоша [1]. Такой подход совмещает изотропную и нелинейную модели упрочнения, которые учитывают эффект Баушингера при обратном нагружении [2], [3]. 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 [4], [5].

Механические свойства исследуемых образцов стали DP 780, соответствующие стандарту Mazda MES MM 106G SPCN 780Y, определялись на универсальной разрывной машине.

Истинная диаграмма поведения двухфазных сталей представлена на рисунке 1. Образцы стали предварительно сжимались до значения эффективной остаточной деформации 0,02 (участок А-В), имитируя деформацию кузова при столкновении автомобиля, затем нагрузка снималась (участок В-С), после этого растягивалась (участок С-Г), имитируя ремонтное растяжение. Для наглядности на графике (рис.1) сжатие и растяжение отложены в первом положительном квадранте. Анализируя экспериментальное поведение двухфазной стали DP 780 (рис. 1), в фазе растяжения можно выделить следующие элементы: эффект Баушингера (точка D), переходное упрочнение вблизи начала пластичности (точка E) и постоянное разупрочнение на участке (F-G). Для построения модели поведения такой стали предлагается использовать феноменологическую двухповерхностную теорию течения материала Шабоша [1].

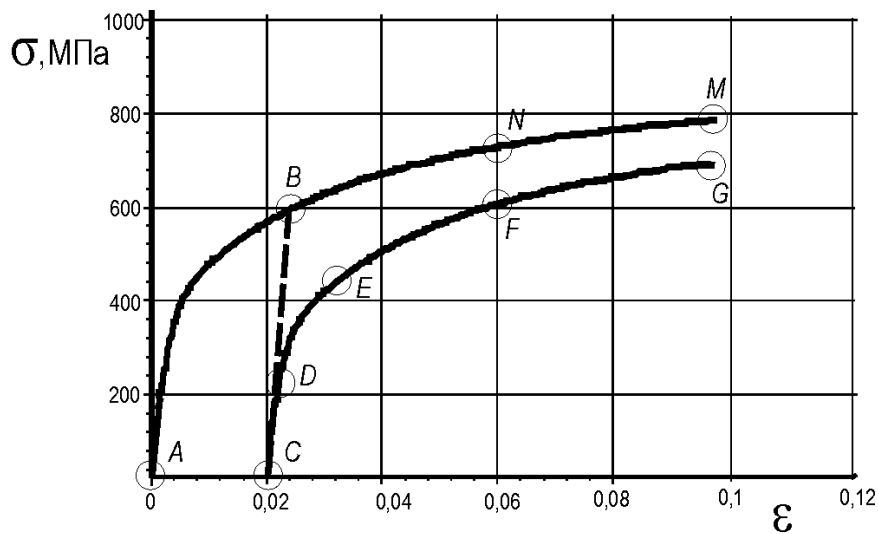


Рис. 1. Сжатие-растяжение двухфазной стали DP 780

Определяющие соотношения модели пластичности двухфазной стали.

Согласно теории 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.

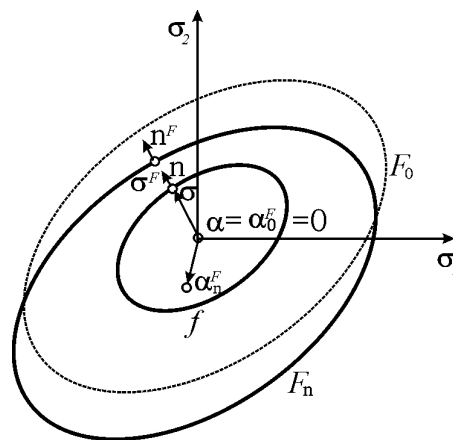


Рис. 2. Графическая интерпретация двухповерхностной модели пластичности материала

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

Поверхности f и F могут быть описаны уравнениями:

$$f = \varphi(\mathbf{y} - \mathbf{b}) - r(\epsilon^P, \dot{\epsilon}^P, T) = 0, \tag{1}$$

$$F = \Phi(\mathbf{y}^F - \mathbf{b}^F) - R(\epsilon^P, \dot{\epsilon}^P, T) = 0, \tag{2}$$

где r и R - ограничивают размеры поверхностей f и F , соответственно, месторасположение центров которых, определяется тензорами остаточных микронапряжений \mathbf{b} и \mathbf{b}^F соответственно.

Размеры и центры поверхностей f и F не меняются во время упругой деформации, которая подчиняется классическим линейным принципам. Определяющие соотношения, общие для всех видов деформаций в предлагаемой модели можно записать следующим образом:

$$dy = C_0 : de^e = C : (de - de^p) , \quad (3)$$

$$de = de^e + de^{ne} + de^p , \quad (4)$$

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

где C_0 - постоянный тензор модулей упругости, демонстрирующий растяжение атомных связей; C - функция тензора линейной и нелинейной упругости, который отражает изменение модуля Юнга E , представляющая наклон кривой одноосного нагружения в координатах $\sigma - \varepsilon$. Уравнение (5) гарантирует параллельность тензоров e^e и e^{ne} .

При достижении тензора напряжений y границы поверхности f центр поверхности b начинает смещаться вместе с поверхностью в сторону роста напряжений. 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

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

$$de^{ne} = (S - S_0) : dy , \quad (5)$$

где S и S_0 - тензоры с компонентами обратными матрицам, представляющих тензоры C и C_0 . Для условий холодной ремонтной вытяжки на малых скоростях деформации можно считать, что в этой зоне продолжает действовать закон Гука с постоянным модулем упругости. Тогда изменением модуля упругости можно пренебречь при оценке экспериментального графика растяжения стали (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 $y = y^F$ и приращение тензора напряжений направлено наружу поверхности f , $dy :: dn > 0$.

В этот момент присутствуют все три вида деформаций, описываемые данной теорией - пластическая деформация e^p , упругая деформация e^e и нелинейно-упругая деформация e^{ne} . В процессе деформации размеры f и F могут изменяться, в соответствии с эволюционными законами, которые отражают изотропное упрочнение и обеспечивают конгруэнтность тензоров y и y^F . (5)

При пассивной разгрузке поверхность пропорциональности f перемещается на величину b назад под воздействием напряжений, вызывавших упруго-нелинейную деформацию, а затем упругая деформация e^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 b^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 b^F описываем в согласно классической модели Шабаша.

$$b^F = b_1^F + b_2^F , \quad (6)$$

$$db_1^F = \frac{2}{3} C_1 de^p - \gamma b_1^F d\bar{e}^p , \quad (7)$$

$$db_2^F = \frac{2}{3} C_2 de^p , \quad (8)$$

$d\bar{e}^p$ - приращение эквивалентной пластической деформации определяется по критерию фон Мизеса

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

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

Экспериментальная оценка модели

При ремонтном пластическом деформировании размеры поверхностей f и F представляют собой функционалы от эквивалентной пластической деформации, накопленной за время жизни кузова автомобиля, скоростей деформирования, температур ремонта, длительности и пути приложения температурного воздействия. При больших пластических деформациях сжатия возможен поворот осей зерен, который может оказывать существенное влияние на результаты моделирования.

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

где R_0, r_0 - пределы текучести и пропорциональности стали соответственно в момент поставки, определяется из графиков растяжения материала.

Для условий ремонтной правки кузова на холодную в направлении обратном направлению удара, можно пренебречь поворотом зерен, температурным влиянием и скоростью деформации, тогда функционал G должен описывать только изотропное деформационное упрочнение и вырождается до

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

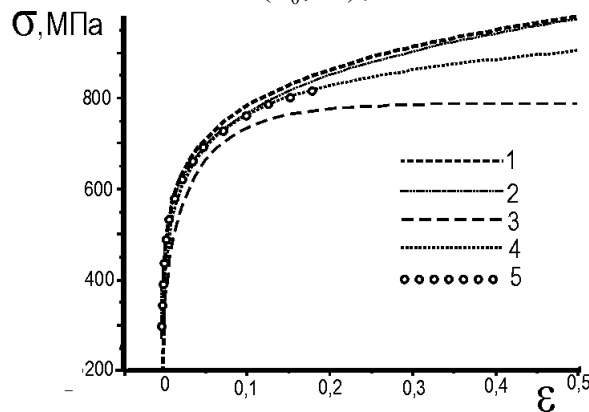


Рис. 3. Сравнение эффективности моделирования упрочнения стали DP 780 (1 – уравнение Льюдвика, 2 – уравнение Свифта, 3 – уравнение Хокет-Шерби, 4 – комбинированное уравнение Свифта и Хокет-Шерби, 5 – экспериментальный график деформирования стали DP 780)

Для описания упрочнения было проведено сравнение эффективности моделирования экспериментальной диаграммы тремя наиболее популярными законами, используемыми для описания упрочнения материала. Для моделирования были использованы уравнение Льюдвика (12), уравнение Свифта (13) и уравнение Хокет-Шерби (14).

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

где n - коэффициент упрочнения, K – постоянная свойств материала.

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

где C_3, A, m - постоянные свойств материала.

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

где R_0, B, a, v - постоянные свойств материала.

В таблице 1 представлены значения постоянных свойств материала для стали DP780, полученные в результате обработки экспериментальных данных монотонного одноосного сжатия-растяжения методом наименьших квадратов.

Из графика (рис.3) видно, что начальную фазу упрочнения материала все уравнения моделируют примерно одинаково хорошо, но при деформациях больше 0,02 уравнение Хокет-Шерби (14) недооценивает напряжения, а другие две формулы переоценивают, особенно уравнение Свифта (13). Из анализа видно, что все три уравнения моделируют поведение стали DP780, особенно при больших деформациях, неудовлетворительно. Комбинирование уравнений Людвига и Хокет-Шерби (рис.3, график 4) демонстрирует наилучшее приближение, особенно при дальнейшей аппроксимации:

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

где β -комбинирующий фактор.

Таблица 1

Эмпирические коэффициенты моделей деформирования стали DP780

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

Выводы

Предложена модель, описывающая 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, возможность существования зоны непропорциональных упругих деформаций перед наступлением пластичности.

Проведено сравнение, существующих законов для описания упрочнения. Наиболее точно поведение материала описывает, предложенная модель, полученная в результате комбинирования законов Людвига и Хокет-Шерби. Комбинированный закон (15) более точно описывает поведение стали DP780 во всем диапазоне деформаций. Следует отметить, что предложенные модели рассчитаны на использовании 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 получены отдельно в соответствии с экспериментальными данными.

Полученная модель может быть использована для моделирования поведения кузовных деталей автомобилей, изготовленных из двухфазных сталей DP780 во время ДТП и на операциях кузовного ремонта. Сложностью модели является необходимость 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.

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