

УДК 539.5

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ КРИСТАЛЛОГРАФИЧЕСКОЙ ТЕКСТУРЫ НА КРИВЫЕ ПРЕДЕЛЬНЫХ ДЕФОРМАЦИЙ ЛИСТОВЫХ ЗАГОТОВОК

© 2020 Я.А. Ерисов<sup>1,2</sup>, Ф.В. Гречников<sup>1,2</sup>, С.В. Сурудин<sup>2</sup>, В.А. Разживин<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Самарский федеральный исследовательский центр Российской академии наук

<sup>2</sup> Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королёва

Статья поступила в редакцию 06.04.2020

В технологических расчетах процессов формообразования деталей летательных аппаратов, двигателей и других изделий машиностроения до сих пор используются соотношения теории пластичности, основанной на феноменологическом подходе и гипотезе сплошной (бесструктурной) среды, куда не входят параметры кристаллографической текстуры и константы кристаллической решетки, являющиеся физической основой прочности, пластичности и анизотропии свойств заготовок. Следовательно, нет и основы для непосредственного анализа деформационных возможностей высокотекстурированных материалов в конкретных технологических операциях, а главное - для расчета и проектирования эффективных для формообразования и эксплуатации компонент текстуры. В статье проведен теоретический расчет кривых предельных деформаций (FLC) на основании модифицированного критерия предельного нагружения П. Хора и условия пластичности, учитывающего в явном виде константы кристаллической решетки и ориентационные факторы текстуры с использованием полученной модели для основных идеальных кристаллографических ориентаций, характерных для материалов с кубической кристаллической решеткой, построены кривые предельных деформаций.

*Ключевые слова:* предельная деформация, условие пластичности, кристаллографическая ориентация, модифицированный критерий предельного нагружения

DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-2-118-123

### ВВЕДЕНИЕ

В практике листовой штамповки стандартом для оценки условий начала локализованного образования шейки в процессе формообразования листового металла при различных видах нагружения (от одноосного растяжения, сдвига и плоской деформации до равноосного двухосного растяжения) стали кривые предельных деформаций (FLC) [1], которые впервые были использованы в работах [2,3].

Экспериментальное построение кривых предельных деформаций по-прежнему остается самым надежным способом прогнозирования разрушения материала. Однако, используемые

*Ерисов Ярослав Александрович, доктор технических наук, доцент, научный сотрудник отдела металлофизики авиационных материалов СамНЦ РАН, доцент кафедры обработки металлов давлением Самарского университета. E-mail: yaroslav.erisov@mail.ru*

*Гречников Федор Васильевич, доктор технических наук, академик РАН, профессор, главный научный сотрудник СамНЦ РАН, заведующий кафедрой обработки металлов давлением Самарского университета. E-mail: gretch@ssau.ru*

*Сурудин Сергей Викторович, кандидат технических наук, доцент кафедры обработки металлов давлением Самарского университета. E-mail: innosam63@gmail.com*  
*Разживин Василий Андреевич, инженер кафедры обработки металлов давлением Самарского университета. E-mail: vasia.razzhivin@yandex.ru*

экспериментальные методы относительно трудоемкие и дорогостоящие, так как для их проведения необходимо специализированное оборудование, большое количество испытываемого материала [27]. При этом полученные результаты не всегда удается воспроизвести.

В связи с этим разработано множество моделей и подходов для теоретического построения кривых предельных деформаций, которые можно условно разделить на энергетические и кинематические [4]. Энергетические критерии [5-8] фактически предсказывают не момент разрушения заготовки, а ее несущую способность (максимальную нагрузку), что дает возможность их использования для прогнозирования предразрушающего состояния заготовки.

Кинематические критерии [9], в отличие от энергетических, предсказывают не максимальную несущую способность заготовки, а ее предельное деформированное состояние в момент локализации деформации, когда на большей части заготовки формоизменение останавливается. Наибольшее распространение среди кинематических методов получили методы Г. Свифта и Р. Хилла [10,11]. Оценка достоверности данных методов показала, что метод Г. Свифта целесообразно использовать для построения кривой предельной деформации только для области, где обе главных деформаций в плоскости листа принимают положительные значения, а метод Р.

Хилла, где одна из деформаций имеет отрицательные значения. Таким образом, совместное применение данных методов позволяет теоретически построить кривую предельных деформаций [12].

В работах З. Марчиняка и К. Кучинского локализация деформаций объясняется тем, что она возникает в начальной геометрической неоднородности (канавке) на поверхности листа [13,14]. В более поздних работах [15-18] модель Марчиняка-Кучинского неоднократно совершенствовалась для того, чтобы учесть различные особенности поведения материала при пластической деформации, например, анизотропию свойств. Однако, основным недостатком всех этих моделей является условие наличия дефекта в виде канавки, размеры и расположение которого значительно влияют на результаты расчетов, кроме того, в большинстве случаев, для их нахождения требуются экспериментальные данные.

В последние годы широкое распространение получил модифицированный критерий предельного нагружения, предложенный П. Хора [19-24], в соответствии с которым достижение максимального усилия в процессе нагружения является необходимым, но не достаточным условием наступления разрушения. При локализации деформации в процессе формообразования происходит изменение деформированного состояния в области шейки на плоское, что приводит к возникновению дополнительных растягивающих напряжений, как раз и являющихся причиной разрушения деформируемой заготовки. Таким образом, модифицированный критерий предельного нагружения учитывает изменение деформированного состояния при локализации деформаций, что позволяет значительно повысить точность теоретического построения кривых предельных деформаций.

В данной работе на основании модифицированного критерия предельного нагружения и условия пластичности, учитывающего в явном виде параметры строения материала упругие константы кристаллической решетки и кристаллографическую ориентацию структуры [25], разработана математическая модель для расчета кривых предельных деформаций.

### РАЗРАБОТКА МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ

Рассмотрим процесс двухосного растяжения прямоугольного листа из ортотропного материала в условиях плоского напряженного состояния ( $\sigma_3 = 0$ ). Криволинейные координатные линии  $u$  и  $v$  выбраны так, чтобы они совпадали с траекториями главных нормальных напряжений  $\sigma_1$  и  $\sigma_2$ , а также с главными осями анизотропии (рисунок 1).

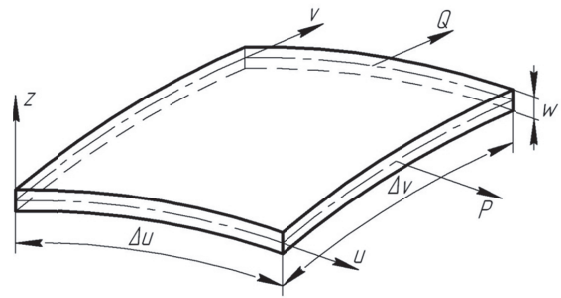


Рис. 1. Элемент листовой заготовки, находящийся в двухосном напряженном состоянии

Модифицированный критерий предельного нагружения по П. Хора [19-24] записывается следующим образом:

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1} + \frac{\partial \sigma_1}{\partial m_\varepsilon} \frac{\partial m_\varepsilon}{\partial \varepsilon_1} = \sigma_1, \quad (1)$$

где  $m_\varepsilon$  – показатель деформационного состояния:

$$m_\varepsilon = \frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1}, \quad (2)$$

где  $\varepsilon_1$  и  $\varepsilon_2$  – главные нормальные деформации

Два слагаемых,  $\frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1}$  и  $\frac{\partial \sigma_1}{\partial m_\varepsilon} \frac{\partial m_\varepsilon}{\partial \varepsilon_1}$ , описывают

приращение напряжений, вызванное упрочнением и изменением деформированного состояния на плоское соответственно. В процессе пластической деформации происходит увеличение напряжений из-за упрочнения материала, однако, скорость упрочнения  $\frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1}$  уменьшается. При

условии  $\frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1} > \sigma_1$ , отношение деформаций не

изменяется –  $m_\varepsilon = const$ , а значит  $\dot{m}_\varepsilon = 0$ .

Как только  $\frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1} \leq \sigma_1$ , то деформированное со-

стояние  $m_\varepsilon$  изменится. Очевидно, что влияние изменения отношения деформаций будет зависеть от используемого условия пластичности.

Воспользуемся условием пластичности, разработанным в работе [25], которые для случая плоского напряженного состояния в главных осях анизотропии запишется следующим образом:

$$\sigma_i = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(\eta_{12} + \eta_{31}) - 2\eta_{12}m_\sigma + (\eta_{12} + \eta_{23})m_\sigma^2} \sigma_1; \quad (3)$$

где  $m_\sigma = \sigma_1 / \sigma_2$  – показатель напряженного состояния;  $\eta_{ij}$  – обобщенные показатели анизотропии:

$$\eta_{ij} = 1 - \frac{15(A' - 1)}{3 + 2A'} \left( \Delta_i + \Delta_j - \Delta_k - \frac{1}{5} \right), \quad (4)$$

$A'$  – параметр анизотропии кристаллической решетки:

$$A' = \frac{S'_{1111} - S'_{1122}}{2S'_{2323}}, \quad (5)$$

$S'_{ijkl}$  – константы кристаллической решетки;  $\Delta_i$  – ориентационные факторы кристаллографической ориентировки:

$$\Delta_i = \frac{h_i^2 k_i^2 + k_i^2 l_i^2 + l_i^2 h_i^2}{(h_i^2 + k_i^2 + l_i^2)^2}, \quad (6)$$

$h_i, k_i, l_i$  – индексы Миллера, определяющие  $i$ -е направление в кристалле относительно системы координат, связанной с листом.

Выражения для интенсивности деформаций и главных деформаций имеют вид:

$$\varepsilon_i = \sqrt{2} \frac{\sqrt{(\eta_{12} + \eta_{31}) - 2\eta_{12}m_\sigma + (\eta_{12} + \eta_{23})m_\sigma^2}}{(\eta_{12} + \eta_{31}) - \eta_{12}m_\sigma} \varepsilon_1; \quad (7)$$

$$\varepsilon_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{(\eta_{12} + \eta_{31}) - \eta_{12}m_\sigma}{\sqrt{(\eta_{12} + \eta_{31}) - 2\eta_{12}m_\sigma + (\eta_{12} + \eta_{23})m_\sigma^2}} \varepsilon_i, \quad (8)$$

$$\varepsilon_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \frac{(\eta_{12} + \eta_{23})m_\sigma - \eta_{12}}{\sqrt{(\eta_{12} + \eta_{31}) - 2\eta_{12}m_\sigma + (\eta_{12} + \eta_{23})m_\sigma^2}} \varepsilon_i.$$

Подставляя уравнения (8) в соотношение (2) получим уравнения связи между показателями напряженного  $m_\sigma$  и деформированного  $m_\varepsilon$  состояний:

$$m_\varepsilon = \frac{(\eta_{12} + \eta_{23})m_\sigma - \eta_{12}}{(\eta_{12} + \eta_{31}) - \eta_{12}m_\sigma}. \quad (9)$$

Используя зависимость (9), преобразуем выражения (3) и (7) к виду:

$$\sigma_i = \frac{\sqrt{\eta_{12}\eta_{23}\eta_{31}N} \sqrt{(\eta_{12} + \eta_{31})m_\varepsilon^2 + 2\eta_{12}m_\varepsilon + (\eta_{12} + \eta_{23})}}{\sqrt{2} (\eta_{12}m_\varepsilon + (\eta_{12} + \eta_{23}))} \sigma_1, \quad (10)$$

$$\varepsilon_i = \frac{\sqrt{2}}{\sqrt{\eta_{12}\eta_{23}\eta_{31}N}} \sqrt{(\eta_{12} + \eta_{31})m_\varepsilon^2 + 2\eta_{12}m_\varepsilon + (\eta_{12} + \eta_{23})} \varepsilon_1. \quad (11)$$

Распишем первое слагаемое в критерии П. Хора (1) следующим образом:

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1} = \frac{\partial \sigma_1}{\partial \sigma_i} \frac{\partial \sigma_i}{\partial \varepsilon_i} \frac{\partial \varepsilon_i}{\partial \varepsilon_1}, \quad (12)$$

Примем, что упрочнение материала описывается степенной функцией:

$$\sigma_i = K \varepsilon_i^n, \quad (13)$$

где  $K$  и  $n$  – константы анизотропного материала.

После дифференцирования выражений для интенсивности напряжений (10), интенсивности деформаций (11) и степенной функции упрочнения (13) первое слагаемое в критерии П. Хора примет вид:

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial \varepsilon_1} = \frac{2n}{\eta_{12}\eta_{23}\eta_{31}N} \left[ \eta_{12}m_\varepsilon + (\eta_{12} + \eta_{23}) \right] \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i}. \quad (14)$$

Дифференцируя уравнения (10) и (2), распишем второе слагаемое в критерии П. Хора (1):

$$\frac{\partial \sigma_1}{\partial m_\varepsilon} \frac{\partial m_\varepsilon}{\partial \varepsilon_1} = 2 \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i} \frac{m_\varepsilon^2}{(\eta_{12} + \eta_{31})m_\varepsilon^2 + 2\eta_{12}m_\varepsilon + (\eta_{12} + \eta_{23})}. \quad (15)$$

Окончательно, подставляя выражения (14), (15) и (10) в критерий (1), определим предельную интенсивность деформаций:

$$\varepsilon_i^{sp} = \sqrt{2} \frac{\sqrt{(\eta_{12} + \eta_{31})m_\varepsilon^2 + 2\eta_{12}m_\varepsilon + (\eta_{12} + \eta_{23})}}{\sqrt{\eta_{12}\eta_{23}\eta_{31}N}} \left[ n + \frac{\eta_{12}\eta_{23}\eta_{31}Nm_\varepsilon^2}{[(\eta_{12} + \eta_{31})m_\varepsilon^2 + 2\eta_{12}m_\varepsilon + (\eta_{12} + \eta_{23})][\eta_{12}\beta + (\eta_{12} + \eta_{23})]} \right]. \quad (16)$$

Подставляя (16) в (11) с учетом (2), определим предельные деформации по П. Хора:

$$\varepsilon_1^{sp} = n + \frac{\eta_{12}\eta_{23}\eta_{31}Nm_\varepsilon^2}{[(\eta_{12} + \eta_{31})m_\varepsilon^2 + 2\eta_{12}m_\varepsilon + (\eta_{12} + \eta_{23})][\eta_{12}\beta + (\eta_{12} + \eta_{23})]}, \quad (17)$$

$$\varepsilon_2^{sp} = m_\varepsilon \varepsilon_1^{sp}.$$

Расчет  $m_\varepsilon$  в уравнениях (17) осуществляется по зависимости (9) для заданных значений  $m_\sigma$ . Выражения (17) позволяют построить кривую предельную деформации на отрезке  $m_\sigma \in [0, 1]$  с учетом кристаллографической ориентации структуры материала.

## РЕЗУЛЬТАТЫ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

Для листовых материалов характерны определенные преимущественные кристаллографические ориентировки. Так после прокатки сплавов с кубической решеткой преобладают следующие ориентировки деформационного типа:  $\{112\}\langle 111 \rangle$  (медь),  $\{110\}\langle 112 \rangle$  (латунь),  $\{123\}\langle 634 \rangle$  (S) и  $\{100\}\langle 011 \rangle$  («куб на ребре»). В отожженных листах преимущественными являются ориентировки рекристаллизационного типа:  $\{100\}\langle 001 \rangle$  (кубическая) и  $\{110\}\langle 001 \rangle$  (Госса). При этом доля конкретных ориентировок определяется режимами прокатки и термической обработки.

Рассмотрим лист из меди, для которого компоненты тензора податливости  $S'_{ijkl}$  равны:  $S'_{1111} = 15.0$  ТПа<sup>-1</sup>;  $S'_{1122} = -6.30$  ТПа<sup>-1</sup> and  $S'_{2323} = 3.33$  ТПа<sup>-1</sup>, тогда по формуле (5):  $A' = 3.203$ . Для указанных идеальных кристаллографических ориентировок по формулам (4) и (6) рассчитаны обобщенные показатели анизотропии (таблица 1).

На рисунке 2 показаны кривые предельных деформаций для различных кристаллографических ориентировок (таблица 1) при  $n = 0,35$ . Из рисунка 2 видно, что при  $m_\varepsilon < 0$  ориентировкой, обеспечивающие наивысшие деформационные возможности, является  $\{110\}\langle 001 \rangle$ , но при  $m_\varepsilon > 0$

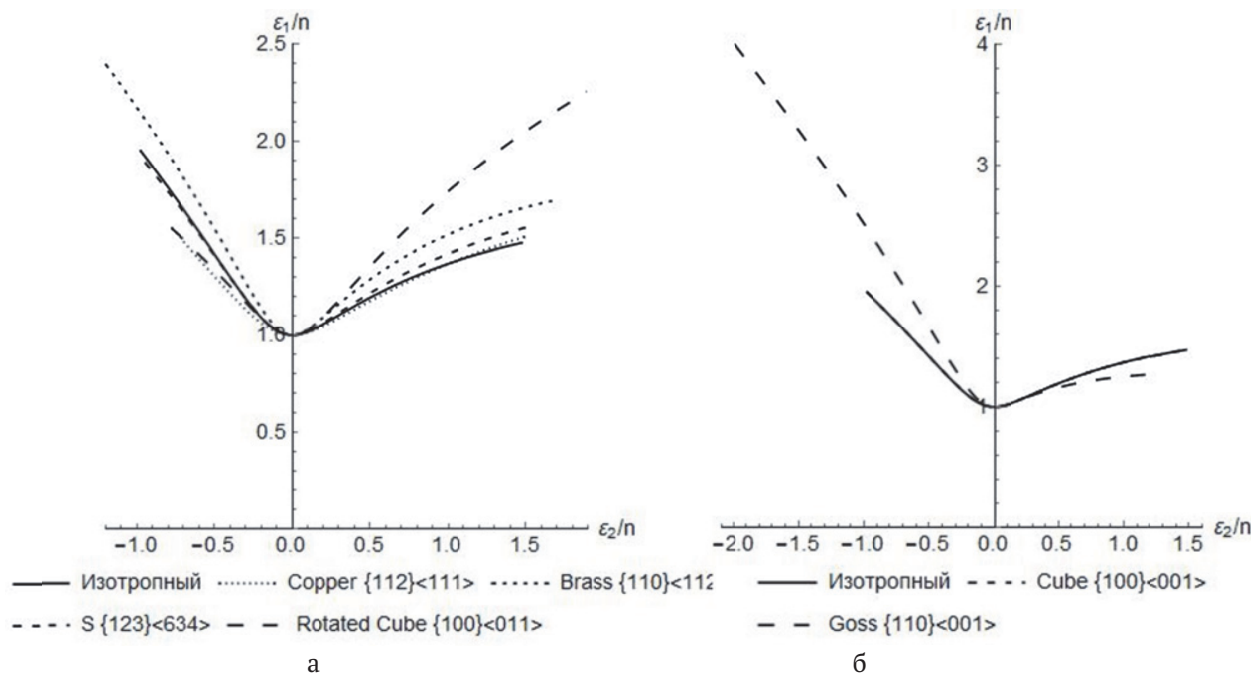
**Таблица 1.** Ориентационные факторы и обобщенные показатели анизотропии идеальных кристаллографических ориентировок

Кристаллографическая ориентировка		Ориентационные факторы			Обобщенные показатели анизотропии		
Наименование	$\{hkl\}\langle uvw \rangle$	$\Delta_1$	$\Delta_2$	$\Delta_3$	$\eta_{12}$	$\eta_{23}$	$\eta_{31}$
Медь	$\{112\}\langle 111 \rangle$	0,333	0,250	0,250	0,533	1,116	0,533
Латунь	$\{110\}\langle 112 \rangle$	0,250	0,333	0,250	0,533	0,533	1,116
S	$\{123\}\langle 634 \rangle$	0,281	0,278	0,250	0,617	0,835	0,814
«Куб на ребре»	$\{100\}\langle 011 \rangle$	0,250	0,250	0,0	-0,054	1,703	1,703
Кубическая	$\{100\}\langle 001 \rangle$	0,0	0,0	0,0	1,703	1,703	1,703
Госса	$\{110\}\langle 001 \rangle$	0,0	0,250	0,250	1,703	-0,054	1,703
Изотропный случай		0,20	0,20	0,20	1,0	1,0	1,0

данная ориентировка показывает самые низкие предельные деформации. Аналогичная картина наблюдается и для некоторых других рассматриваемых ориентировок. Например, ориентировка  $\{100\}\langle 011 \rangle$  обеспечивает наивысшие деформационные возможности при  $m_\varepsilon > 0$ , но при  $m_\varepsilon < 0$  – все наоборот. Кривые для изотропного случая и кубической ориентировки совпадают.

В отличие от метода Р. Хилла и Г. Свифта [26], метод П. Хора позволяет построить обе ветви кривой предельной деформации, при этом в области  $m_\varepsilon < 0$  учитывается влияние кристаллографической ориентации структуры.

Сравнивая кривые предельных деформаций для различных ориентировок, можно увидеть, что дополнительные напряжения, возникающие вследствие изменения деформированного состояния на плоское, могут приводить как к увеличению (например, ориентировка  $\{100\}\langle 011 \rangle$ , правая ветвь кривой), так и уменьшению предельных деформаций ( $\{110\}\langle 001 \rangle$ ) по сравнению со случаем, когда учитывается только упрочнение. Влияние дополнительных напряжений определяется не только кристаллографией структуры материала, но и деформированным состоянием.



**Рис. 2.** Кривые предельных деформаций по методу П. Хора для идеальных кристаллографических ориентировок деформационного (а) и рекристаллизационного (б) типов

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе были построены кривые предельных деформаций материала на основе критерия П. Хора с учетом условия пластичности, учитывающего кристаллографию структуры материала. Однозначно назвать ориентировку, обеспечивающую наилучшие деформационные возможности невозможно, так как предельные деформации зависят от напряженно – деформированного состояния вызванному, конкретной технологической операцией листовой штамповки. Так при линейном растяжении наилучшие показатели у ориентировки деформационного типа, при двухстороннем растяжении – у ориентировок рекристаллизационного типа. Таким образом, при производстве листовых заготовок необходимо назначить согласованные режимы прокатки и промежуточной термической обработки (отжига), обеспечивающие формирование заданных идеальных кристаллографических ориентировок, необходимых для повышения предельных деформаций в конкретных операциях листовой штамповки.

## БЛАГОДАРНОСТЬ

Исследование выполнено в рамках госзадания (тема FSSS-2020-0016).

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. *Banabic, D.* Formability of Metallic Materials. Plastic Anisotropy, Formability Testing, Forming Limits / D. Banabic, H.J. Bunge, K. Pöhlandt, A.E. Tekkaya. – Berlin: Springer, 2000. – 335 p.
2. *Keeler, S.P.* Plastic instability and fracture in sheet stretched over rigid punches / S.P. Keeler, W.A. Backhoffen // ASM Trans. Q. – 1964. – Vol. 56. – P. 25-48.
3. *Goodwin, G.M.* Application of strain analysis to sheet metal forming problems in the press shop / G.M. Goodwin // J. SAE Tech. – 1968. – Art. No. 680093.
4. *Чумадин, А.С.* Теория и расчеты процессов листовой штамповки (для инженеров) / Чумадин А.С. – Москва: МАТИ, 2014. – 215 с.
5. *Storakes, B.* Plastic and visco-plastic instability of a thin tube under internal pressure, torsion and axial tension / B. Storakes // JJVS. – 1968. – Vol. 10, №6. – P. 510-529.
6. *Малинин, Н.Н.* Устойчивость двухосного пластического растяжения анизотропных листов и цилиндрических оболочек / Н.Н. Малинин // Известия АН СССР. Механика твердого тела. – 1971. – №2. – С. 115-118.
7. *Korhonen, A.S.* On the theories of sheet metal necking and forming limits / A.S. Korhonen // Journal of Engineering Materials and Technology. – 1978. – Vol. 100. – P. 303-309.
8. *Дель, Г.Д.* Технологическая механика / Г.Д. Дель. – М.: Машиностроение, 1978. – 174 с.
9. *Stoughton, T.B.* Review of theoretical models of the strain-based FLD and their relevance to the stress-based / T.B. Stoughton, X. Zhu // International Journal of Plasticity. – 2004. – Vol. 20. – P. 1463-1486.
10. *Swift, H.W.* Plastic instability under plane stress / H.W. Swift // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. – 1952. – Vol. 1. – P. 1-18.
11. *Hill, R.* On discontinuous plastic states, with special reference to localized necking in thin sheets / R. Hill // Journal of the Mechanics and Physics of Solids. – 1952. – Vol. 1. – P. 19-30.
12. *Morales-Palma, D.* On the Use of Maximum Force Criteria to Predict Localised Necking in Metal Sheets under Stretch-Bending / D. Morales-Palma, A.J. Martínez-Donaire, C. Vallellano // Metals. – 2017. – Vol. 7. – Art. No. 469.
13. *Marchiniak, Z.* Limit strains in the processes of stretch-forming sheet metal / Z. Marchiniak, K. Kuczynski // Int. J. Mech. Sci. – 1967. – Vol. 9. – P. 609-620.
14. *Marchiniak, Z.* Influence of the plastic properties of material on the forming limit diagram for sheet metal in tension / Z. Marchiniak, K. Kuczynski, T. Pokora // Int. J. Mech. Sci. – 1973. – Vol. 15. – P. 789-805.
15. *Xu, S.* Prediction of forming limit curves of sheet metals using Hill's 1993 user-friendly yield criterion of anisotropic materials / S. Xu, K.J. Weinmann // International Journal of Mechanical Sciences. – 1998. – Vol. 40(9). – P. 913-925.
16. *Yoshida, K.* Path-dependence of the forming limit stresses in a sheet metal / K. Yoshida, T. Kuwabara, M. Kuroda // International Journal of Plasticity. – 2007. – Vol. 23(3). – P. 361-384.
17. *Allwood, J.M.* Generalised forming limit diagrams showing increased forming limits with non-planar stress states / J.M. Allwood, D.R. Shouler // International Journal of Plasticity. – 2009. – Vol. 25(7). P. 1207-1230.
18. *Hu, Q.* Prediction of forming limits for anisotropic materials with nonlinear strain paths by an instability approach / Q. Hu, L. Zhang, Q. Ouyang, X. Li, X. Zhu, J. Chen // International Journal of Plasticity. – 2018. – Vol. 103. – P. 143-167.
19. *Hora, P.* A prediction method for ductile sheet metal failure using FE-simulation / P. Hora, L. Tong, J. Reissner // Proceedings of NUMISHEET'96, Dearborn, 1996. P. 252-256.
20. *Hora, P.* Mathematical prediction of FLC using macroscopic instability criteria combined with micro structural crack propagation models / P. Hora, L. Tong, J. Reissner // Proceedings of Plasticity conference, Quebec, 2003. P. 364-366.
21. *Hora, P.* Numerical prediction of FLC using the enhanced modified maximum force criterion (eMMFC) / P. Hora, L. Tong // Proceedings of FLC-Zurich'06, 2006. P. 31-36.
22. *Krauer, J.* Forming limits prediction of metastable materials with temperature and strain induced martensite transformation / J. Krauer, P. Hora, L. Tong // Proceedings of the 9th International Conference on Numerical Methods in Industrial Forming Processes (NUMIFORM 2007), Porto, 2007. P. 1263-1268.
23. *Hora, P.* Theoretical prediction of the influence of curvature and thickness on the enhanced modified maximum force criterion / P. Hora, L. Tong // Proceedings of the 7th International Conference and Workshop on Numerical Simulation of 3D Sheet Metal Forming Processes (NUMISHEET 2008), Interlaken, 2008. P. 205-210.

24. Hora, P. Modified maximum force criterion, a model for the theoretical prediction of forming limit curves / P. Hora, L. Tong, B. Berisha // *International Journal of Material Forming*. – 2013. – Vol. 6(2). – P. 267-279.
25. Ерисов Я.А., Гречников Ф.В., Сурудин С.В. Критерий пластичности анизотропной среды с учетом кристаллографии структуры и его экспериментальная проверка // *Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.Л. Носова*. 2016. Т.14. №4. С. 42– 49.
26. Сурудин С.В., Ерисов Я.А., Разживин В.А., Петров И.Н. Построение кривых предельных деформаций по методу Хилла - Свифта с учетом кристаллографии структуры // *Известия Тульского государственного университета. Технические науки*. – 2019. – № 5. – С. 256-262.
27. ISO 12004-2:2008 Metallic materials – Sheet and strip – Determination of forming-limit curves – Part 2: Determination of forming-limit curves in the laboratory

## RESEARCH OF THE INFLUENCE OF CRYSTALLOGRAPHIC TEXTURE ON THE FORMING LIMIT CURVES OF BLANKS

© 2020 Ya.A. Erisov<sup>1,2</sup>, F.V. Grechnikov<sup>1,2</sup>, S.V. Surudin<sup>2</sup>, V.A. Razzhivin<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Samara Federal Research Center of the Russian Academy of Sciences

<sup>2</sup>Samara National Research University

In technological calculations of the forming processes of parts of aircraft, engines and other mechanical engineering products, the relations of the plasticity theory based on the phenomenological approach and the hypothesis of a continuous (structureless) medium, which does not include crystallographic texture parameters and crystal lattice constants, are still used. Consequently, there is no basis for a direct analysis of the formability of textured materials in specific technological operations, and most importantly, for the calculation and design of texture components effective for forming performance. The article provides a theoretical calculation of the forming limit curves (FLC) based on the modified maximum force of P. Hora and the yield criteria, which explicitly takes into account the lattice constants and orientation factors of the texture. Using the obtained model for the basic ideal crystallographic orientations characteristic for materials with a cubic crystal lattice, the forming limit curves of ultimate strains are plotted.

*Key words:* limit strain, yield criterion, crystallographic orientation, modified maximum force criterion

DOI: 10.37313/1990-5378-2020-22-2-118-123

---

Yaroslav Erisov, Dr. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Metal Forming Department. E-mail: yaroslav.erisov@mail.ru  
 Fedor Grechnikov, Dr. Sci. (Eng.), Full Member of the Russian Academy of Sciences, Chief Researcher, Head of the Metal Forming Department. E-mail: gretch@ssau.ru  
 Sergey Surudin, Cand. Sci. (Eng.), Associate Professor of the Metal Forming Department. E-mail: innosam63@gmail.com  
 Vasily Razzhivin, Engineer of the Metal Forming Department. E-mail: vasia.razzhivin@yandex.ru