MATHEMATICAL MODEL OF OPERATIONS AXISYMMETRIC ISOTHERMAL EXTRACT DETAILS FROM ANISOTROPIC MATERIALS ON THE RADIAL MATRIX IN THE CREEP REGIME

S.S. Yakovlev, V.Y. Travin, O.V. Pilipenko, V.A. Bulichev

A mathematical model for the operation of the isothermal drawing axially symmetric parts of anisotropic materials for radial matrices in D bench creep is given.

Key words: insulated hood, anisotropy, temperature-cial for the matrix, punch, strength, deformation, creep, stress.

Yakovlev Sergey Sergeevich, doctor of technical sciences, professor, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Travin Vadim Yurievich, candidate of technical sciences, specialist, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, SPA «SPLAV»,

Pilipenko Olga Vasilievna, doctor of technical sciences, professor, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Orel, State University — Education-Science-Production Complex,

Bulichev Vladimir Aleksandrvich, candidate of technical sciences, chief specialist, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, JSC «Central Design Bureau of Apparatus Building»

УДК 539.374; 621.983

МАТЕМАТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ОПЕРАЦИЙ ИЗОТЕРМИЧЕСКОГО ВЫДАВЛИВАНИЯ И СВАРКИ ОРЕБРЕНИЙ В РЕЖИМЕ КРАТКОВРЕМЕННОЙ ПОЛЗУЧЕСТИ

А.А. Перепелкин, В.Н. Чудин, А.В. Черняев, А.А. Пасынков

Приведены математические модели горячего выдавливания оребрений на заготовках и сварки оребрений давлением в режиме кратковременной ползучести. Получены расчётные соотношения для верхнеграничных оценок сил и повреждаемости материала. Даны технологические режимы штамповки и диффузионной сварки оребренных панелей.

Ключевые слова: прессование, оребренные панель, сила, сварка, повреждаемость, технологические режимы, поле скоростей, время.

Технология изготовления оребренных конструкций в настоящее время связана с операциями выдавливания оребрений или диффузионной сварки давлением элементов панелей – ребер и основания [1 – 3]. Высокопрочные титановые, алюминиевые, алюминиево-литиевые и др. сплавы

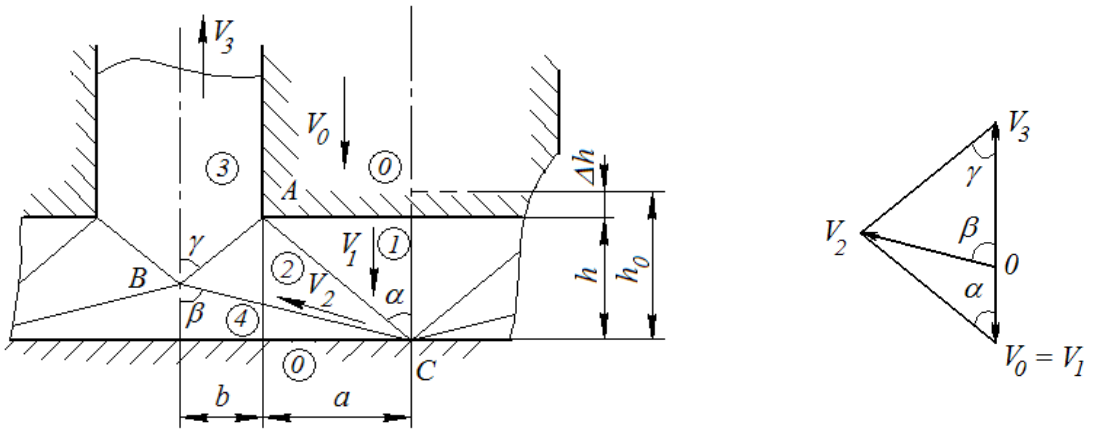
для этих панелей требуют при таком варианте технологии нагрева в оснастке, т.е. изотермического режима штамповки. В процессе деформирования существенна зависимость давления, степени формоизменения, качества изделий от длительности операции, т. к. материал проявляет свойства ползучести, и наряду с пластическими в нем развиваются вязкие деформации. В ряде вариантов технологии пластические деформации и связанное с ними упрочнение могут вообще отсутствовать, а деформирование осуществляется в условиях вязкости (ползучести) материала под нагрузкой.

При проектировании технологии такие параметры, как деформации, силы, скорости являются предметом расчета. Эффективны методы расчета на основе верхнеграничной экстремальной теоремы пластичности на базе разрывных полей скоростей перемещений с привлечением кинетики повреждаемости деформируемого материала [1]. В этой связи ниже рассматриваются названные процессы.

Схема операции выдавливания оребрений показана на рис. 1, здесь же приведено разрывное поле скоростей движения материала заготовки. На рис. 1 обозначено: 1 – подвижная часть штампа; 2 – неподвижная плита штампа; 3 – изделие. Схема деформаций плоская. Поле состоит из жестких блоков “1”, “2”, “3”, “4”. Оснастка обозначена, как блок “0”. Блоки разделены линиями разрыва скоростей и перемещаются со скоростями, указанными на рис. 1. Деформации имеют место только на линиях разрыва, в том числе на границах трения. Поле кинематически допустимо при условиях

$$a\sin(\beta-\alpha)\sin\gamma = b\sin\alpha\sin(\beta+\gamma);\ \alpha = arctg\frac{a}{h};\ \gamma = arctg\frac{b}{h-(a+b)ctg\beta},$$

где α, β, γ, a, b, h – параметры поля скоростей.



а ***б***

Рис. 1. Схема выдавливания, поле скоростей (а) и годограф (б)

По этим соотношениям определяется геометрия поля скоростей, что входит в последующие расчетные соотношения. Скорости на линиях разрыва выражаются соотношениями:

$$\left.\begin{aligned}
\left(V_p\right)_\tau &= \left(V_{12}\right)_\tau = \frac{V_0 \sin\beta}{\sin(\beta-\alpha)} = k_{12}V_0,\\
\left(V_{23}\right)_\tau &= \frac{a}{b}\frac{V_0 \sin\beta}{\sin(\beta+\gamma)} = k_{23}V_0,\\
\left(V_{24}\right)_\tau &= V_1 = \frac{V_0 \sin\alpha}{\sin(\beta-\alpha)} = k_{24}V_0,\\
\left(V_{30}\right)_\tau &= V_k = V_0 + V_2 = \left(1+\frac{a}{b}\right)V_0 = k_{30}V_0,
\end{aligned}\right\} \qquad (1)$$

где V_0 – скорость перемещения штампа.

Эквивалентные скорости деформаций на линиях разрыва будем определять, как

$$\left(\xi_e\right)_p = \frac{2}{\sqrt{3}}\frac{\left(V_p\right)_\tau}{l_p}. \qquad (2)$$

Здесь

$$l_p = l_{12} = \frac{a}{\sin\alpha},\ l_{23} = \frac{b}{\sin\gamma},\ l_{24} = \frac{a+b}{\sin\beta} \qquad (3)$$

длины линий разрыва скоростей; t – время деформирования; $\left(V_p\right)_\tau$ – разрывы касательных скоростей в соответствии с выражениями (1).

Технологические данные показывают [2], что горячее прессование панелей реализуется при медленном деформировании в условиях нелинейно-вязкого течения материала. В этой связи для расчета эквивалентных напряжений справедливо уравнение состояния деформируемого материала в виде функции

$$\sigma_e = A\psi\xi_e^n, \qquad (4)$$

где ξ_e – эквивалентные скорости деформаций на линиях разрыва скоростей в соответствии с выражением (2); ψ – сплошность деформируемого материала заготовки; A, n – константы материала.

Условие $\psi = 1$ соответствует отсутствию нарушения сплошности, а $\psi = 0$ – полная ее потеря с возможным разрушением заготовки. Промежуточные значения ψ определяют фактическое состояние сплошности, ее влияние на напряжения, достигаемые степени формообразования и конечное качество изделия. С помощью уравнения (4), учитывая выражение (2), запишем эквивалентные напряжения на линиях разрыва в виде

$$\left(\sigma_e\right)_p = A\psi\left(\frac{2}{\sqrt{3}}\frac{\left(V_p\right)_\tau}{l_p}\right)^n. \qquad (5)$$

На контактной границе трения эквивалентные скорости деформаций определим осредненно как

$$(\xi_e)_k = \frac{2}{\sqrt{3}t}\ln\frac{h_0}{h}. \qquad (6)$$

Касательные напряжения трения, учитывая уравнение (4) и соотношение (6), представим в виде

$$\tau_{mp} = \mu(\sigma_e)_k = \mu A\psi_{30}\left(\frac{2}{t\sqrt{3}}\ln\frac{h_0}{h}\right)^n, \qquad (7)$$

где μ – коэффициент трения.

Верхнеграничной оценке давления штамповки соответствует энергетическое неравенство [4]

$$q \le \frac{1}{aV_0}\Sigma\left[\frac{1}{\sqrt{3}}(\sigma_e)_p V_p l_p + \tau_{mp}V_k l_k\right]. \qquad (8)$$

Здесь все входящие величины определены соотношениями (1) – (7). Подстановка их в неравенство (8) приводит к следующей зависимости для давления операции:

$$q \le \frac{A}{2a}\left(\frac{2}{\sqrt{3}}\right)^{1+n}\left(\frac{1}{t}\right)^n\left\{(\Delta h)^n\left[\psi_{12}k_{12}^{1+n}\left(\frac{a}{\sin\alpha}\right)^{1-n} + \psi_{23}k_{23}^{1+n}\left(\frac{b}{\sin\gamma}\right)^{1-n} + \right.\right.$$

$$\left.\left. + \psi_{24}k_{24}^{1+n}\left(\frac{a+b}{\sin\beta}\right)^{1-n}\right] + \mu\sqrt{3}\psi_{30}k_{30}l_k\left(\ln\frac{h_0}{h}\right)^{1-n}\right\}. \qquad (9)$$

где $h_0 = h + \Delta h$ – начальная толщина заготовки; h – конечная ее толщина; Δh – ход штампа; l_k – длина границы трения; ψ_{12}, ψ_{23}, ψ_{24}, ψ_{30} – сплошности материала заготовки на соответствующих линиях разрыва скоростей и на границе трения. Давление штамповки, как это следует из соотношения (9), зависит от сплошности материала заготовки и времени (длительности) операции. Расчет сплошностей, входящих в зависимость (9), приводится ниже.

Технологическая схема сварки оребрений давлением показана на рис. 2. Сборка заготовок в составе верхнего 1 и нижнего 2 листов и пакета, установленных на нижнем листе ребер 3, помещают на плите 4 штампа. Производятся вакуумирование и нагрев до температуры операции. Далее ходом штампа сборку заготовок смыкают, и ребра 3 локально осаживают в местах контакта с листами 1, 2 с формированием утолщений 5. При выдержке под давлением здесь образуются общие зерна – зоны сварки 6. Соединение происходит без оплавления, т.е. в твердой фазе. Изделие 7 является единой целиковой конструкцией. При необходимой температуре и степени разрежения расчетными технологическими параметрами являются давление и время (длительность) этих параметров процесса сварки. Расчет

этих параметров проводится энергетическим методом, как это сделано для процесса выдавливания. Поле скоростей перемещений областей заготовок показано также на рис. 2. Данное поле реализуется при следующей связи его параметров:

$$(a+b)\sin\frac{\pi}{4}\sin\alpha = b\sin(\alpha+\beta)\cos\left(\frac{\pi}{4}-\beta\right);$$

$$\beta = \arcsin\left[\frac{a}{b}\sin\frac{\pi}{4}\sin\alpha\sin\left(\frac{\pi}{4}+\alpha+\beta\right)\right].$$

Отсюда определяются углы α, β и строится поле скоростей. Скорости на линиях разрыва этого поля

$$(V_\rho)_\tau = (V_{01})_\tau = \frac{V_0\sin\beta}{2\sin\alpha};\ (V_{12})_\tau = V_1 = \frac{V_0\sin(\alpha+\beta)}{2\sin\alpha}. \qquad (10)$$

Эквивалентные скорости деформаций и напряжения на линиях разрыва определяются выражением

$$\left.\begin{aligned}(\xi_e)_{01} &= \frac{k}{(a+b)t},\ (\xi_e)_{12} = \frac{k}{at},\\ (\sigma_e)_{01} &= A(\xi_e)_{01}^n,\ (\sigma_e)_{12} = A(\xi_e)_{12}^n,\end{aligned}\right\} \qquad (11)$$

где $k = \dfrac{\Delta h\cdot\sin\beta\cdot\sin(\alpha+\beta)}{\sqrt{3}\cdot\sin\alpha}$.

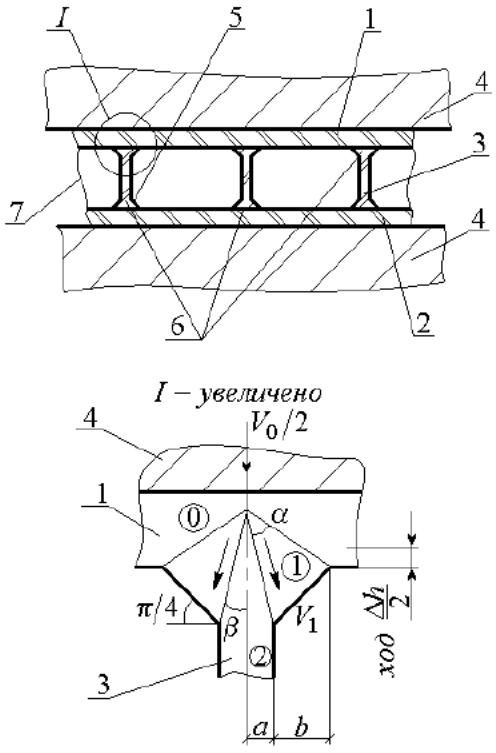


Рис. 2. Схема осадки - сварки оребренной панели

Длины линий разрыва данного поля

$$l_{01} = \frac{a+b}{\sin(\alpha+\beta)}, \quad l_{12} = \frac{a}{\sin\beta}. \tag{12}$$

По неравенству (8) с учетом записанных выражений (10) - (12) получим

$$q \le A\left(\frac{1}{\sqrt{3}}\right)^{1+n}\left(\frac{\Delta h}{t}\right)^{n}\left[\left(\frac{1}{a+b}\right)^{n}\left(\frac{\sin\beta}{\sin\alpha}\right)^{n+1}(\sin(\alpha+\beta))^{n-1} + \right.$$

$$\left. + \left(\frac{1}{a}\right)^{n}\frac{a}{(a+b)}\left(\frac{\sin(\alpha+\beta)}{\sin\alpha}\right)^{n+1}(\sin\beta)^{n-1}\right]. \tag{13}$$

Зависимость (13) устанавливает связь между технологическими параметрами процесса: давлением, осадкой заготовки, временем.

В процессе деформирования материал заготовки теряет исходную сплошность и в нем может развиваться процесс накапливания механических повреждений. Это зависит от температурно-скоростных условий обработки, режима деформаций и влияет на качество изделия. При выдавливании реализуют больше деформации, и здесь этот фактор имеет большое значение.

Проведем оценку критических режимов штамповки в зависимости от состояния сплошности деформируемого материала. Сплошность может быть определена в соответствии с энергетической или деформационной теориями прочности [1 - 3]. По первой из них используется уравнение

$$d\psi = -\frac{1}{A_*}\sigma_e\xi_e dt, \tag{14}$$

где $1 \ge \psi \ge 0$ – сплошность материала в соответствии с временем $0 \le t \le t_{kp}$; t_{kp} – критическое время полной потери сплошности; σ_e, ξ_e – эквивалентные напряжение и скорость деформации в расчетном месте заготовки; A_* – константа, характеризующая удельную работу напряжений в этом месте.

Подстановка полученных выше соотношений (2), (5) - (7) в уравнение (14) при замене $V_0 = \Delta h / t$ приводит в результате интегрирования к зависимостям

$$\psi_{л.р.} = \exp\left[-\frac{A}{nA_*}\left(\frac{2k\Delta h}{\sqrt{3}l_p}\right)^{1+n} t^{-n}\right] - \tag{15}$$

сплошность на линиях разрыва скоростей;

$$\psi_{mp.} = \exp\left[-\frac{A}{nA_*}\left(\frac{2}{\sqrt{3}} \ln\frac{h}{h_0} \right)^{1+n} t^{-n} \right] - \qquad (16)$$

сплошность на контактной границе трения.

Здесь k, l_p – величины, принимаемые по выражениям (1) и (3) в соответствии с рассматриваемой линией разрыва и границей трения; Δh – заданный (конечный) рабочий ход пуансона.

По деформационной теории прочности сплошность материала определяется зависимостью

$$\psi = 1 - \frac{1}{(\varepsilon_e)_{np.}} \int d\varepsilon_e , \qquad (17)$$

где ε_e – эквивалентная деформация в рассматриваемом месте заготовки; $(\varepsilon_e)_{np}$ – предельная эквивалентная деформация материала.

В этой связи на линиях разрыва и на границе трения имеем

$$\psi_{л.р.} = 1 - \frac{2k\Delta h}{\sqrt{3} l_p (\varepsilon_e)_{np.}} ; \qquad (18)$$

$$\psi_{mp.} = 1 - \frac{2}{\sqrt{3}(\varepsilon_e)_{np.}} \ln\frac{h}{h_0} . \qquad (19)$$

Расчет величин A_*, $(\varepsilon_e)_{np.}$ приведен в работах [2, 3]. Из представленных зависимостей следует, что в первом случае сплошность определяется степенью формообразования и временем, а во втором она от времени не зависит. Входящие величины сплошностей рассчитываются по соотношениям (15), (16) или (18), (19).

Расчеты выполнены для прессования оребренных панелей из алюминиевого сплава АМг6 при 450 и 420 °С. Размеры панели: a = 25 мм, b=10 мм, h=30 мм; $l_k = l_{mp} = 15$ мм, $\Delta h = 5$ мм. Принят коэффициент трения $\mu = 0{,}15$. Константы уравнений: $A = 175\ МПа/с^n$, n = 0,27, $A_* = 35$ МПа – при 450 °С и $A = 177\ МПа/с^n$, n=0,25, $(\varepsilon_e)_{np}$ = 0,8 – при 420° С. В табл. 1 приведены величины давления операции в функции конечного времени и повреждаемость материала. Повреждаемость рассчитана в одной из наиболее опасных точек – т. A.

При 450 °С повреждаемость материала уменьшается при увеличении длительности операции, т.е. сплошность сохраняется в большей мере при увеличении времени деформирования. Температурный режим штамповки 420 °С может привести к полной потере сплошности независимо от

длительности операции. Прессование при этой температуре может сопровождаться разрушением материала. Уменьшить вероятность разрушения возможно понижением степени формообразования. Давление прессования уменьшается при увеличении длительности операции в обоих температурных режимах. Развитие несплошности (повреждаемости) материала способствует снижению давления; ее влияние на величину давления снижается по мере увеличения времени. При этом интенсивно развивается ползучесть.

Таблица 1

Величины давления операции и повреждаемости материала от времени деформирования

Температура, $^{\circ}C$	Время t, мин	Давление q, МПа	Повреждаемость, $\omega = 1 - \psi$
450/420	10	85/100	$>1/0{,}75$
	15	63/82	$>1/0{,}6$
	20	50/75	$>1/0{,}53$

Режимы сварки давлением рассчитаны применительно к изготовлению панелей с закрытым (внутренним) оребрением. Материалы - титановый сплав ВТ6С при температуре 900 °С и алюминиевый 1420 при 380 °С. Константы сплавов соответственно: $A = 330\ МПа/с^n$; $n = 0{,}377$ и $A = 410\ МПа/с^n$; $n = 0{,}385$. Приняты размеры заготовок: $a = 2{,}5$ мм; $b = 3$ мм; $\Delta h = 3{,}5$ мм. Отметим, что диффузионная сварка алюминиевых сплавов требует удаления окисной пленки на поверхностях заготовок и нанесения подслоя меди. Сварка производится в вакууме. Конструкции из титановых сплавов соединяют в вакууме или среде нейтрального газа, растворяющего пленку окисла и препятствующего образованию альфированного слоя. Расчетные и экспериментальные данные приведены в табл. 2.

Таблица 2

Расчетные и экспериментальные данные

Материал	Температура, $^{\circ}C$	Время, мин	Давление, МПа	
			расчет	эксперимент
ВТ6С ВТ14	900	10	5,7	до 10…15
		20	7,3	
1420	380	10	15,3	до 15
		20	12,5	
АМг6	500	20	13,5	до 15

Снижение давления сварки достигается при увеличении времени выдержки под нагрузкой. По данным механических испытаний сварных изделий прочность соединений соответствует прочности исходных материалов.

Список литературы

1. Работнов Ю.Н. Механика деформируемого твердого тела. М.: Наука, 1979. 774 с.

2. Изотермическое деформирование высокопрочных анизотропных материалов / С.П. Яковлев [и др.]. М.: Машиностроение, 2004. 427с.

3. Изотермическое формоизменение анизотропных материалов жестким инструментом в режиме кратковременной ползучести / С.С. Яковлев [и др.]. М.: Машиностроение, 2009. 412 с.

4. Теория обработки металлов давлением: учебник для вузов / В.А. Голенков [и др.] / под ред. В.А. Голенкова, С.П. Яковлева. М.: Машиностроение, 2009. 442 с.

Перепелкин Алексей Алексеевич, канд. техн. наук, доц., mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Чудин Владимир Николаевич, д-р техн. наук, проф., mpf-tula@rambler.ru, Россия, Москва, Институт путей сообщения,

Черняев Алексей Владимирович, д-р техн. наук, проф., mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет,

Пасынков Андрей Александрович, канд. техн. наук, доц., mpf-tula@rambler.ru, Россия, Тула, Тульский государственный университет

MATHEMATICAL MODELS OF OPERATIONS ISOTHERMAL EXTRUSION AND WELDING FINNED MODE SHORT-TERM CREEP

A.A. Perepelkin, V.N. Chudin, A.V. Chemyaev, A.A. Pasynkov

Mathematical models of hot extrusion ribbing on for cooking and welding-finned pressure mode transient creep are given. We obtain the calculated ratio estimates for verhnegranichnyh forces and material damage. Technological regimes stamping and diffusion welding Orebro-governmental panels are presented.

Key words: pressing, ribbed panel, power, welding, damages the bridge, technological modes, the velocity field time.

Perepelkin Aleksey Alekseevich, candidate of technical sciences, docent, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Chudin Vladimir Nikolaevich, doctor of technical sciences, professor, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Moscow, Moskow State University of Ways of communications,

Chernyaev Aleksey Vladimirovich, doctor of technical sciences, professor, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University,

Pasynkov Andrey Aleksandrovich, candidate of technical sciences, docent, mpf-tula@rambler.ru, Russia, Tula, Tula State University

УДК 621.983; 539.374

ВЫТЯЖКА КОРОБЧАТЫХ ДЕТАЛЕЙ ПРЯМОУГОЛЬНОГО ПОПЕРЕЧНОГО СЕЧЕНИЯ С БОЛЬШИМИ УГЛОВЫМИ РАДИУСАМИ

А.Н. Малышев

Приведена математическая модель операции вытяжки коробчатых деталей с большими угловыми радиусами из анизотропных листовых материалов. Изложены результаты теоретических исследований силовых режимов операции вытяжки низких коробчатых деталей с большими угловыми радиусами.

Ключевые слова: коробчатая деталь, математическая модель, напряжение, деформация, пластичность, сила, мощность, анизотропия, матрица, пуансон, вытяжка.

Коробки с относительно большими угловыми радиусами ($r_{угл}/(2A_1 - H) \geq 0{,}4$) вытягивают из овальных заготовок. Форма заготовок образована радиальным контуром напротив меньших сторон коробки и прямыми – напротив больших сторон. Здесь A_1 и H – ширина и высота детали; $r_{угл}$ - угловой радиус детали. В соответствии с принятыми технологическими методиками определяют конкретные размеры заготовок, исходя из разверток и рекомендуемых степеней вытяжки [1, 2].

Листовой материал, подвергаемый процессам деформирования, как правило, обладает анизотропией механических свойств, которая может оказывать как положительное, так и отрицательное влияние на устойчивое протекание технологических процессов глубокой вытяжки [3 – 6].

Математическая модель вытяжки коробчатых деталей. На рис. 1 показана расчетная схема операции вытяжки. Фланец заготовки состоит из зон деформаций и жестких зон. К угловым участкам фланца прилегают зоны деформаций. Перемещения точек – радиальные к центру углового радиуса (точка O_2). Жесткие зоны, прилегающие к прямым участкам внутреннего контура фланца, перемещаются по нормалям к прямолинейным участкам матрицы. Линиями разрыва скоростей $(l_p)_1 > (l_p)_2$ разделены зоны деформаций и жестких зон.