

ВЛИЯНИЕ ВНЕКОНТАКТНЫХ ЗОН НА УШИРЕНИЕ ПРИ ВАЛЬЦОВКЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В ОВАЛЬНЫХ КАЛИБРАХ

Скрябин С. А., Чайка Д. С.

Рассмотрен механизм влияния внеконтактных зон на уширение при вальцовке цилиндрических заготовок в овальных калибрах. Для теоретического исследования уширения при вальцовке применялась, конечно – элементная программа для трехмерного моделирования технологии объемной штамповки QForm. Проведенные сравнительные расчеты физических и геометрических параметров вальцовки заготовок цилиндрического сечения и заготовок без внеконтактных зон в области очага деформации, позволили раскрыть механизм влияния наличия в заготовке внеконтактных зон на уширение. Для расчетов коэффициента влияния внеконтактных зон, была выведена формула его зависимости от кривизны овальных калибров и диаметра заготовки и внесен поправочный коэффициент в формулу по определению уширения для учета влияния внеконтактных зон.

Розглянуто механізм впливу внеконтактних зон на уширення при вальцюванні циліндричних заготовок в овальних калібрах. Для теоретичного дослідження уширення при вальцюванні застосовувалася, звичайно – елементна програма для тривимірного моделювання технології об'ємного штампування QForm. Проведені порівняльні розрахунки фізичних та геометричних параметрів вальцювання заготовок циліндричного перетину і заготовок без внеконтактних зон в області вогнища деформації, дозволили розкрити механізм впливу наявності у заготівлі внеконтактних зон на уширення. Для розрахунків коефіцієнта впливу внеконтактних зон, була виведена формула його залежності від кривизни овальних калібрів і діаметра заготовки і внесений поправочний коефіцієнт в формулу по визначенню уширення для врахування впливу внеконтактних зон.

The mechanism of the effect of non-contact zones on broadening during milling cylindrical billets in oval calibers. For a theoretical study of the broadening was applied during milling, finite – element program for three-dimensional modeling technology forging QForm. Conducted comparative calculations of physical and geometrical parameters of the cylindrical section rolling billets and blanks without non-contact zones in the deformation zone, allowed to reveal the mechanism of the effect of having a non-contact zones of the workpiece on the broadening. To calculate the influence of non-contact zones, it was a formula depending on the curvature of the oval caliber and the workpiece diameter and introduced a correction factor in the formula to determine the broadening to incorporate the effects of non-contact areas.

Скрябин С. А.

Чайка Д. С.

д-р техн. наук, проф. ВНАУ,
scriabin_sa@mail.ru
аспирант ВНАУ,
chaika_ds@mail.ru

УДК 621.7.016.2-412:669.715

Скрябин С. А., Чайка Д. С.

ВЛИЯНИЕ ВНЕКОНТАКТНЫХ ЗОН НА УШИРЕНИЕ ПРИ ВАЛЬЦОВКЕ ЦИЛИНДРИЧЕСКИХ ЗАГОТОВОК ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ В ОВАЛЬНЫХ КАЛИБРАХ

В развитии современного машиностроения актуальным направлением является внедрение малоотходных технологических процессов штамповки поковок из алюминиевых сплавов. Применение новых разработок, особенно в авиационной промышленности, вызвано значительным применением в изделиях отрасли этих сплавов (60–70 %), повышенным расходом металла, высокой трудоемкостью, длительным циклом изготовления качественных штампованных поковок (2–3) штамповки с промежуточными операциями нагрева, обрезки облоя, травления, зачистки) и задачами по совершенствованию металлосберегающих технологий [1].

В работе [1] отмечается, что при «вальцовке заготовок в гладких валках или в калибрах наблюдается неполный охват периметра поперечного сечения заготовки и боковые участки поперечного сечения непосредственному обжатию не подвергаются, т. е. возникают внеконтактные зоны (ВЗ), которые в зависимости от их размера и формы значительно влияют на характер течения металла в очаге деформации». Правильный подход к определению уширения – основа расчета калибров.

Целью работы является исследование влияния ВЗ на уширение, от точности определения которого зависят установление размеров и формы калибров, выбор степени деформации, числа переходов, энергосиловые параметры, качество поверхности вальцуемой заготовки и др.

Исследования показали, что наиболее существенные факторы, влияющие на уширение в процессе вальцовки заготовок в овальном калибре – обжатие и радиус кривизны калибра в плоскости, перпендикулярной к оси вальцовки, а также соотношение геометрических форм калибра и задаваемой заготовки, которое может быть выражено для случая вальцовки заготовок круглого сечения в овальном калибре через отношение радиуса кривизны калибра к радиусу заготовки. Изменение этих параметров приводит к существующему перераспределению сил, действующих на металл в зоне деформации и, как следствие, к изменению значений уширения. В отличие от вальцовки на гладкой бочке, существующая неравномерность деформации по ширине и высоте заготовки, вызванная кривизной овального калибра в поперечном сечении, значительно усложняет решение задачи по определению перемещения металла в очаге деформации.

На основании экспериментальных данных для определения уширения при вальцовке заготовок круглого сечения из сплава АК6 в овальных калибрах была получена эмпирическая формула [1]:

$$\Delta b = K_{yш}^{ов} \cdot \sqrt{(d - h_{об})} \cdot \frac{D_{к}^{об}}{2} \cdot \left(\frac{d - h_{об}}{d} \right) \quad (1)$$

где $h_{об}$ – высота овального калибра, мм, d – диаметр деформируемой заготовки, мм; $D_{к}^{об} = A - (2/3)h_{об}$ – катающий диаметр овального калибра, мм, A – межцентровое расстояние валков, мм; $K_{yш}^{ов}$ – коэффициент, учитывающий влияние на уширение неравномерности деформации по ширине и высоте заготовки в зависимости от кривизны овального калибра [2]:

$$K_{yш}^{ов} = -\sqrt{0,0582t^2 - 0,02123t^2 + 0,2015 + 0,2265t - 0,049} \quad (2)$$

Для определения расчетных зависимостей влияния ВЗ на уширение Δb при вальцовке цилиндрических заготовок из алюминиевых сплавов в овальных калибрах при различных коэффициентах вытяжки λ и диаметрах заготовок, в данной работе применялась программа

для моделирования технологии объемной штамповки «QForm» [3]. Меню программы «QForm» предусматривает возможность переноса любого сечения прокатанной заготовки в формат DXF, площадь и линейные размеры которого измеряются в программе для проектирования «AutoCad». Объяснить механизм влияния ВЗ можно с помощью анализа изменения полей температур, напряжения, скорости и сопротивления деформации, перемещения металла в зависимости от кривизны овальных калибров и диаметра заготовок.

Для расчета, в программу вводились данные для моделирования процесса прокатки алюминиевого сплава АК6 с размерами $\varnothing 25; 35; 50; 65 \times 200$ мм в вальцовочных секторах с диаметром валков $\varnothing 320$ мм, с частотой вращения 65 мин^{-1} и температурой валков 20°C . Температура нагрева заготовок составляла 450°C , коэффициент трения $\mu = 0,35$. Влияние ВЗ на уширение определялось путем измерения величины уширения при вальцовке цилиндрических заготовок (рис 1, а) и заготовок без ВЗ (рис. 1, б) в овальных калибрах, имеющих при коэффициентах вытяжки $\lambda = 1,15 \div 2,35$.

Значения линейного уширения Δb , рассчитывались согласно рис. 1:

- для заготовок с ВЗ замераи $\Delta b = b_1 - b_0$;

- для заготовок без ВЗ: $\Delta b = b'_1 - b'_0$ [4, 5].

Объемный показатель уширения $F_{\text{уш}}/F_{\text{см}}$ рассчитывается как отношение, пошедшей в уширение и смещенной по высоте площади поперечного сечения заготовки [1].

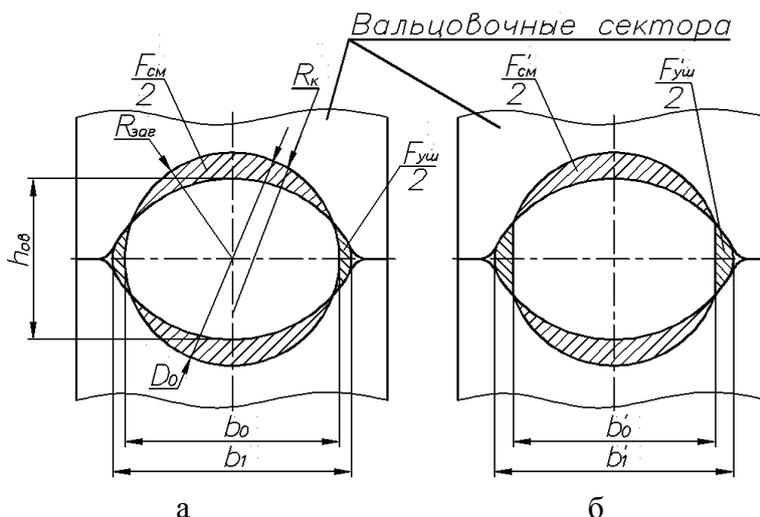


Рис. 1. Схемы сечений овальных заготовок: с ВЗ (а) и без ВЗ (б).

Расчетные измерения показали, что у заготовок без ВЗ линейное и объемное уширение больше, чем у заготовок с ВЗ. Это объясняется тем, что во внеконтактная зона характеризуется более низкой скоростью деформации и более высоким сопротивлением деформации. Механизм влияния внеконтактных зон будет рассмотрен далее.

В формуле 1 все параметры остаются одинаковыми при вальцовке в одном и том же калибре, кроме коэффициента неравномерности деформации $K_{\text{уш}}^{\text{ов}}$, который можно разложить на собственно коэффициент неравномерности деформации $K_{\text{уш-ов}}^{\text{нд}}$ и коэффициент влияния ВЗ $K_{\text{уш-ов}}^{\text{ВЗ}}$.

$$K_{\text{уш}}^{\text{ов}} = K_{\text{уш-ов}}^{\text{нд}} + K_{\text{уш-ов}}^{\text{ВЗ}} \quad (3)$$

Величина уширения Δb при прокатке заготовок без ВЗ при любом диаметре заготовок отличается от Δb при прокатке заготовок с ВЗ на величину относительного отклонения, показывающего влияние ВЗ на процесс вальцовки. Относительное отклонение величины уширения при вальцовке для всех диаметров при прокатке заготовок с ВЗ и без ВЗ определяется по формуле:

$$\delta_{\Delta b} = \frac{\Delta b' - \Delta b}{\Delta b'} \cdot 100\% \quad (4)$$

Аналогично подсчитывалась величина относительного отклонения для объемного показателя уширения $F_{уш}/F_{см}$ с ВЗ и без ВЗ:

$$\delta_{F_{уш}/F_{см}} = \frac{F'_{уш}/F'_{см} - F_{уш}/F_{см}}{F'_{уш}/F'_{см}} \cdot 100\% \quad (5)$$

Расчетные данные показали идентичную зависимость относительного отклонения для линейных показателей уширения $\delta_{\Delta b}$ и объемных показателей уширения $\delta_{F_{уш}/F_{см}}$ для всех диаметров заготовок при вальцовке заготовок с ВЗ и без ВЗ в зависимости от соответствующих коэффициентов вытяжки λ (рис. 2, 3). Программный пакет для статистической обработки данных Statistika 8 [6, 7], позволяет вывести эти зависимости методами нелинейного оценивания по методике, рассмотренной в работе [2]:

- для линейного показателя уширения:

$$\delta_{\Delta b} = \sqrt{1,91579 \cdot \lambda^2 - 5,3262 \cdot \lambda + 3,73715} - 1,4249 \cdot \lambda + 2,01495; \quad (6)$$

- для объемного показателя уширения:

$$\delta_{F_{уш}/F_{см}} = \sqrt{1,80966 \cdot \lambda^2 - 4,7549 \cdot \lambda + 3,1924} - 1,3683 \cdot \lambda + 1,82729. \quad (7)$$

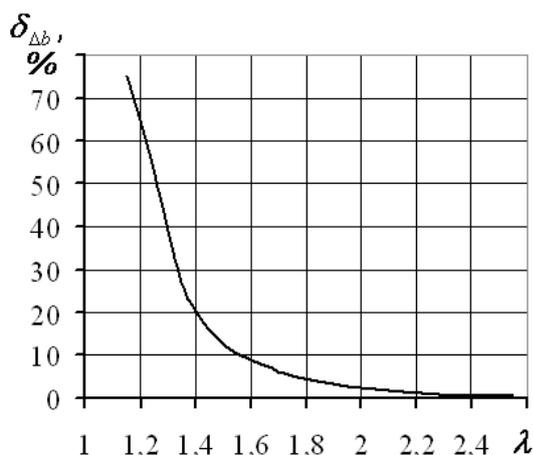


Рис. 2. Расчетная зависимость относительного отклонения показателей уширения при вальцовке заготовок с ВЗ и без ВЗ в овальных калибрах в зависимости от коэффициента вытяжки λ .

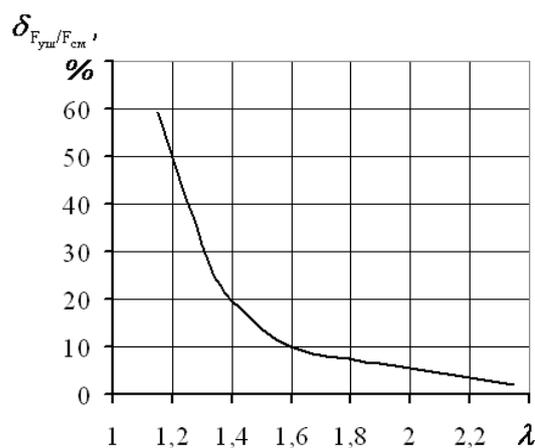


Рис. 3. Расчетная зависимость относительного отклонения объемного показателя уширения $F_{уш}/F_{см}$ при вальцовке заготовок с ВЗ и без ВЗ в овальных калибрах в зависимости от коэффициента вытяжки λ .

Коэффициент влияния ВЗ – $K_{уш_ов}^{B3}$, можно определить из расчета соотношений между коэффициентами неравномерности деформации при вальцовке заготовок с ВЗ и без ВЗ:

$$K_{уш_ов}^{B3} = \frac{\Delta b' - \Delta b}{\Delta b'} \cdot K_{уш}^{ов} \quad (8)$$

Объединяя формулы 4 и 6, определяем, что коэффициент влияния ВЗ $K_{уш_ов}^{B3}$ при вальцовке цилиндрических заготовок в овальных калибрах будет равен произведению относительного отклонения уширения при вальцовке заготовок с ВЗ и без ВЗ на коэффициент неравномерности деформации $K_{уш}^{ов}$:

$$K_{уш_ов}^{B3} = \delta_{\Delta b} \cdot K_{уш}^{ов} \quad (9)$$

С помощью номограммы для определения размеров овального калибра, для исследуемых диаметров заготовок [1], зависимость коэффициента влияния ВЗ $K_{\text{уш}_\text{ов}}^{B3}$ от коэффициента вытяжки λ , была переведена в зависимость от кривизны овальных калибров $i = R_{\text{ов}}/R_{\text{заг}}$ (рис. 4). Зависимости показывают, что при увеличении диаметра, снижается влияние внеконтактных зон на уширение.

Анализ зависимостей для всех диаметров показывает совместный рост коэффициента влияния ВЗ $K_{\text{уш}_\text{ов}}^{B3}$ с коэффициентом неравномерности деформации $K_{\text{уш}}^{\text{ов}}$ [1, 2] при $i < 1,25$. В этом интервале, коэффициент влияния ВЗ составляет от 80 до 30 % от величины коэффициента неравномерности деформации (рис. 2, 3). Это говорит о преимущественном влиянии внеконтактных зон на неравномерность деформации при небольших степенях деформации. При $i \approx 1,25$, коэффициент влияния ВЗ на уширение достигает максимума для всех исследуемых диаметров заготовок (25, 35,50 и 65 мм). При $i \geq 1,25$, величина коэффициента влияния ВЗ $K_{\text{уш}_\text{ов}}^{B3}$, уменьшается.

При коэффициенте вытяжки большем, чем рекомендованный для расчетов при вальцовке по системе круг – овал $\lambda_{\text{max}} = 1,8$ [1], величина коэффициента влияния ВЗ $K_{\text{уш}_\text{ов}}^{B3}$ по отношению к величине коэффициента неравномерности деформации $K_{\text{уш}}^{\text{ов}}$ становится меньше статистической погрешности в 5% (рис. 4). Это свидетельствует о необходимости учитывать влияние ВЗ при расчете уширения при вальцовке в рекомендуемых интервалах вытяжки.

Зависимости коэффициента влияния ВЗ $K_{\text{уш}_\text{ов}}^{B3}$ от кривизны овальных калибров $i = R_{\text{ов}}/R_{\text{заг}}$ и диаметра заготовки D_0 , разделяется максимумом функции на два интервала $i < 1,25$ и $i \geq 1,25$. Формулы зависимости разрабатываются с помощью программного комплекса для статистической обработки данных Statistika 6.0. Для построения поверхностей зависимости используется модуль по построению трехмерных диаграмм рассеивания данных и подгонка точек к поверхности с помощью полинома второй степени [7, 8, 9], (рис. 5).

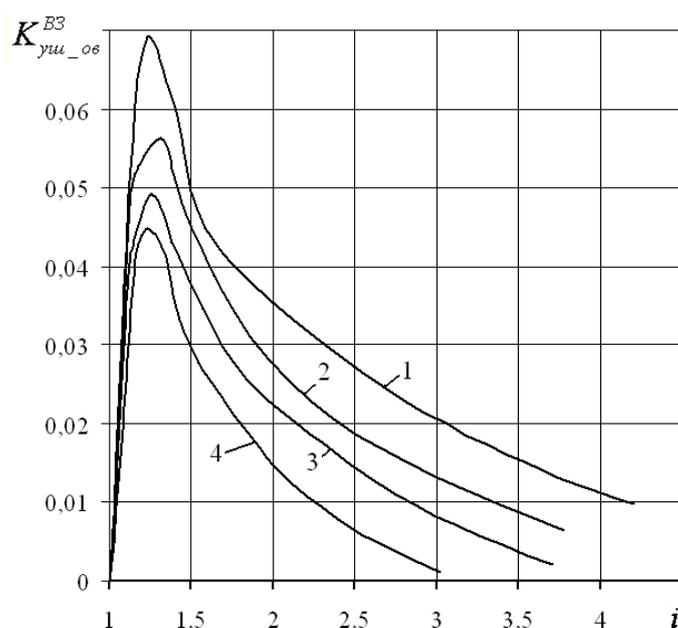


Рис. 4. Зависимость коэффициента влияния ВЗ $K_{\text{уш}_\text{ов}}^{B3}$ от кривизны овальных калибров $i = R_{\text{ов}}/R_{\text{заг}}$ и диаметра заготовки D_0 мм при вальцовке цилиндрических заготовок в овальных калибрах:

1 – $D_0 = 25$ мм; 2 – $D_0 = 35$ мм; 3 – $D_0 = 50$ мм; 4 – $D_0 = 65$ мм.

При малых коэффициентах вытяжки ($i < 1,25$), форма зависимости коэффициента влияния ВЗ $K_{\text{уш_ов}}^{B3}$ в виде полинома второй степени определяется формулой:

$$K_{\text{уш_ов}}^{B3} = 2,517 \cdot D_0 + 0,002 \cdot i - 0,9705 \cdot D_0^2 - 0,0024 \cdot D_0 \cdot i + 3,931 \cdot 10^{-6} \cdot i^2 - 1,5354. \quad (10)$$

Расчеты технологических параметров вальцовки по схеме круг – овал в большинстве случаев ведут в рекомендуемом интервале коэффициента вытяжки: $1,25 \leq i \leq 1,8$. Поэтому для расчетов коэффициента влияния ВЗ $K_{\text{уш_ов}}^{B3}$ на уширение рекомендуется применять формулу зависимости при $i \geq 1,25$:

$$K_{\text{уш_ов}}^{B3} = 0,1599 - 0,0682 \cdot D_0 - 0,0012 \cdot i + 0,0087 \cdot D_0^2 + 0,0001 \cdot D_0 \cdot i + 4,8334 \cdot 10^{-6} \cdot i^2. \quad (11)$$

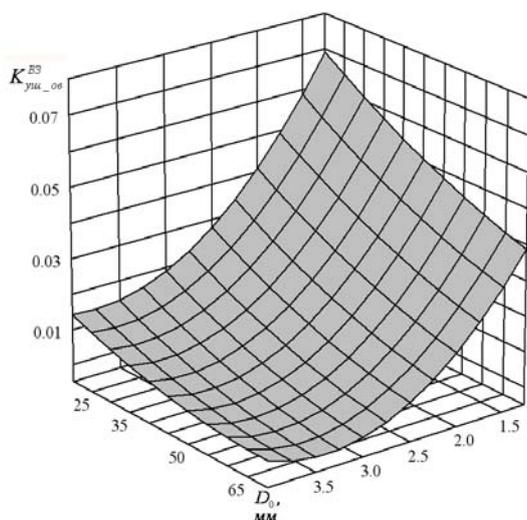


Рис. 5. Зависимость коэффициента влияния ВЗ $K_{\text{уш_ов}}^{B3}$ от кривизны овальных калибров $i = R_{\text{ов}}/R_{\text{заг}}$ и диаметра заготовки D_0 мм при вальцовке цилиндрических заготовок в овальных калибрах, при $i \geq 1,25$

Формула (1) для определения уширения при вальцовке заготовок круглого сечения в овальных калибрах, являются составной частью математической модели [10] для расчета уширения с учетом влияния внеконтактных зон. Влияние ВЗ будет определяться произведением коэффициента влияния ВЗ на уширение $K_{\text{уш_ов}}^{B3}$ на ширину внеконтактной зоны:

$$\Delta b = K_{\text{уш}}^{\text{ов}} \cdot \sqrt{(d - h_{\text{ов}}) \cdot \frac{D_{\text{к}}^{\text{ов}}}{2} \cdot \left(\frac{d - h_{\text{ов}}}{d} \right) - (b_0 - b'_0) \cdot K_{\text{уш_ов}}^{B3}}, \quad (12)$$

где b_0 – ширина заготовки с ВЗ, равная ее диаметру $b_0 = D_0$; b'_0 – ширина заготовки без ВЗ (рис. 1).

Для объяснения полученных зависимостей, необходимо рассмотреть различные параметры, позволяющие оценить поведение металла в очаге деформации. Для всех диаметров зависимости показывают идентичный характер зависимости, поэтому для оценки процесса выбираем вальцовку заготовок диаметром 65 мм. По результатам распределения полей скорости деформации и сопротивления деформации в продольном сечении (рис. 6), можно оценить характер формирования очага деформации. Анализ рис. 6 показывает, что основные изменения параметров вальцовки происходят после прохождения металлом 1/3 очага деформации и переходит в установившуюся стадию перед выходом из калибров.

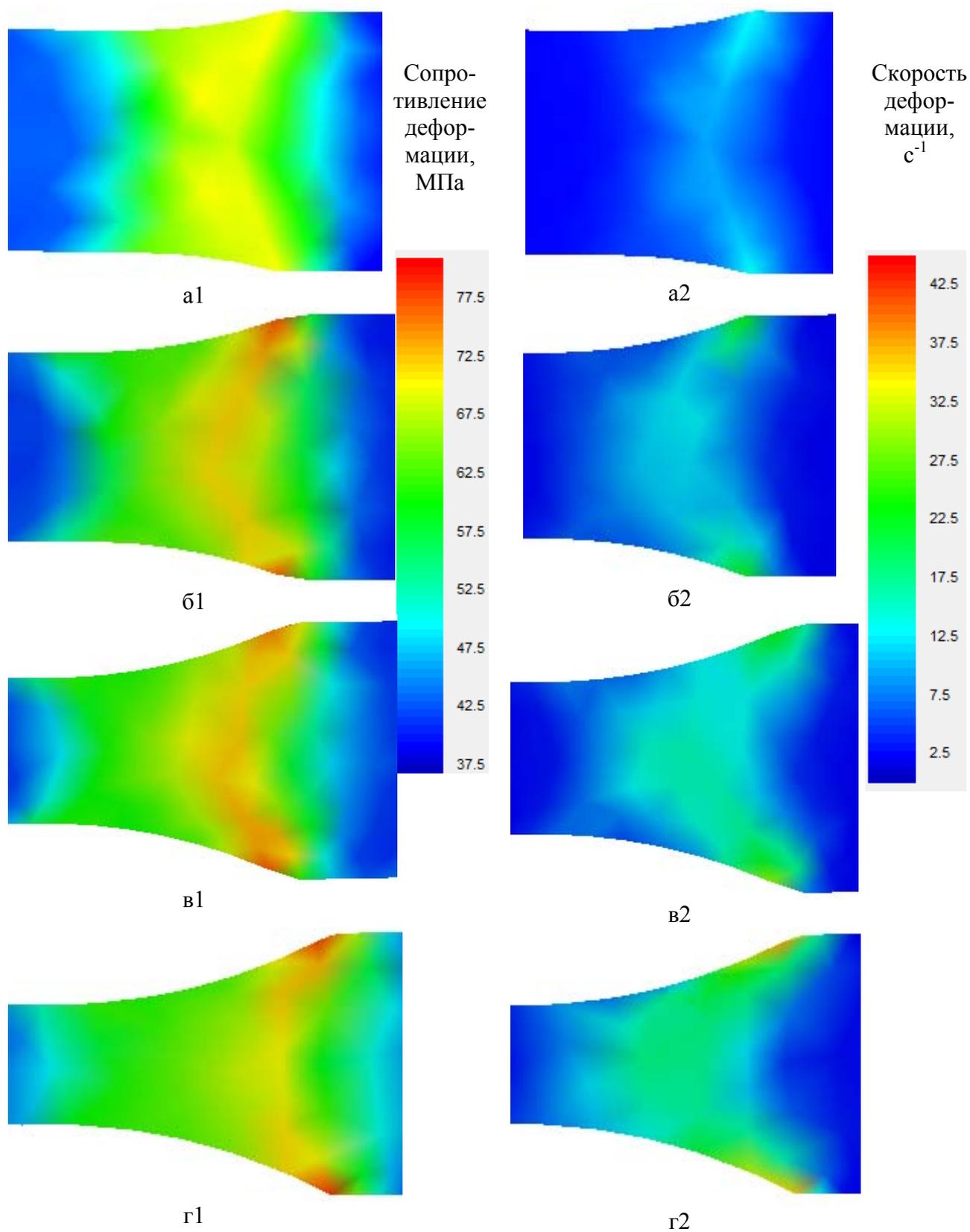


Рис. 6. Поля температуры (1) и скорости деформации (2) в продольном вертикальном сечении очага деформации при вальцовке цилиндрических заготовок $\varnothing 65$ мм с ВЗ при кривизне овальных калибров i :

а – 1,08; б – 1,23; в – 1,52; г – 2,01

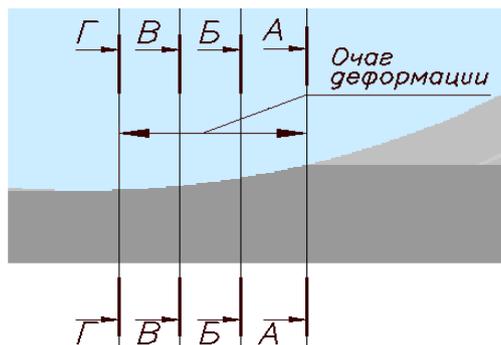


Рис. 7. Исследуемые поперечные сечения очага деформации при вальцовке заготовок диаметром 65 мм с ВЗ и без ВЗ в овальных калибрах при кривизне овальных калибров.

Для установления места в очаге деформации, наиболее подходящего для сравнительного анализа вальцовки заготовок с ВЗ и без ВЗ, определяем напряжения и деформации в поперечных сечениях. Поперечные сечения, в которых снимаем показания результатов моделирования, принимаем, как показано, на рис. 7 Сечения условно обозначены буквами: А-А – вход металла в калибры (начало геометрического ОД), Б-Б – металл прошел 1/3 длины ОД (начало изменения параметров вальцовки), В-В – металл прошел 2/3 длины ОД (формирования установившегося ОД) и Г-Г – вход металла из калибров (конец геометрического ОД).

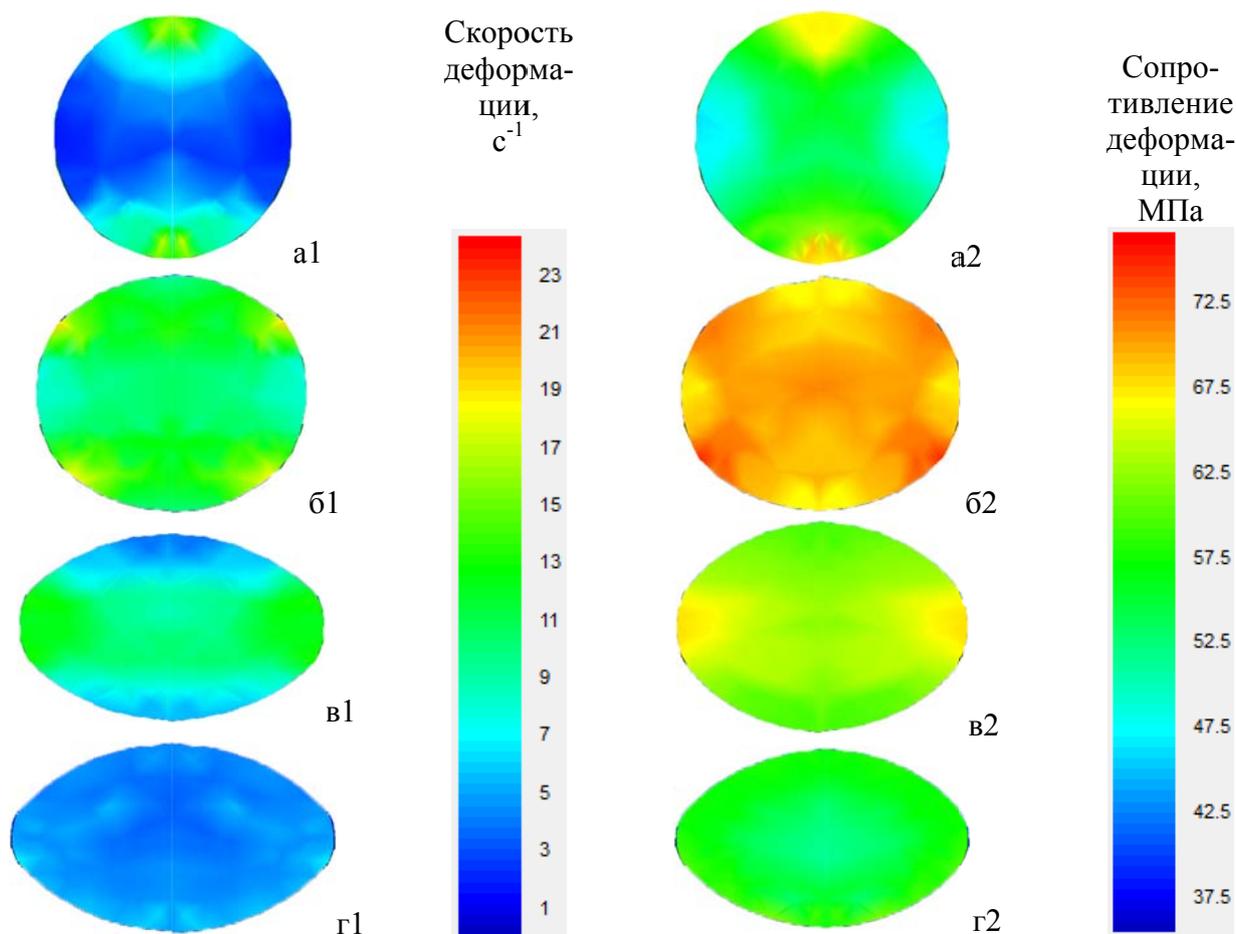


Рис. 8. Поля скорости деформации (1) и сопротивление деформации (2) в поперечных сечениях очага деформации при вальцовке цилиндрических заготовок \varnothing 65 мм с ВЗ при кривизне овальных калибров $i = 1,35$:

а – начало ОД (сечение А-А, рис. 7); б – 1/3 ОД (сечение Б-Б, рис. 7); в – 2/3 ОД (сечение В-В, рис. 7); г- конец ОД (сечение Д-Д, рис. 7)

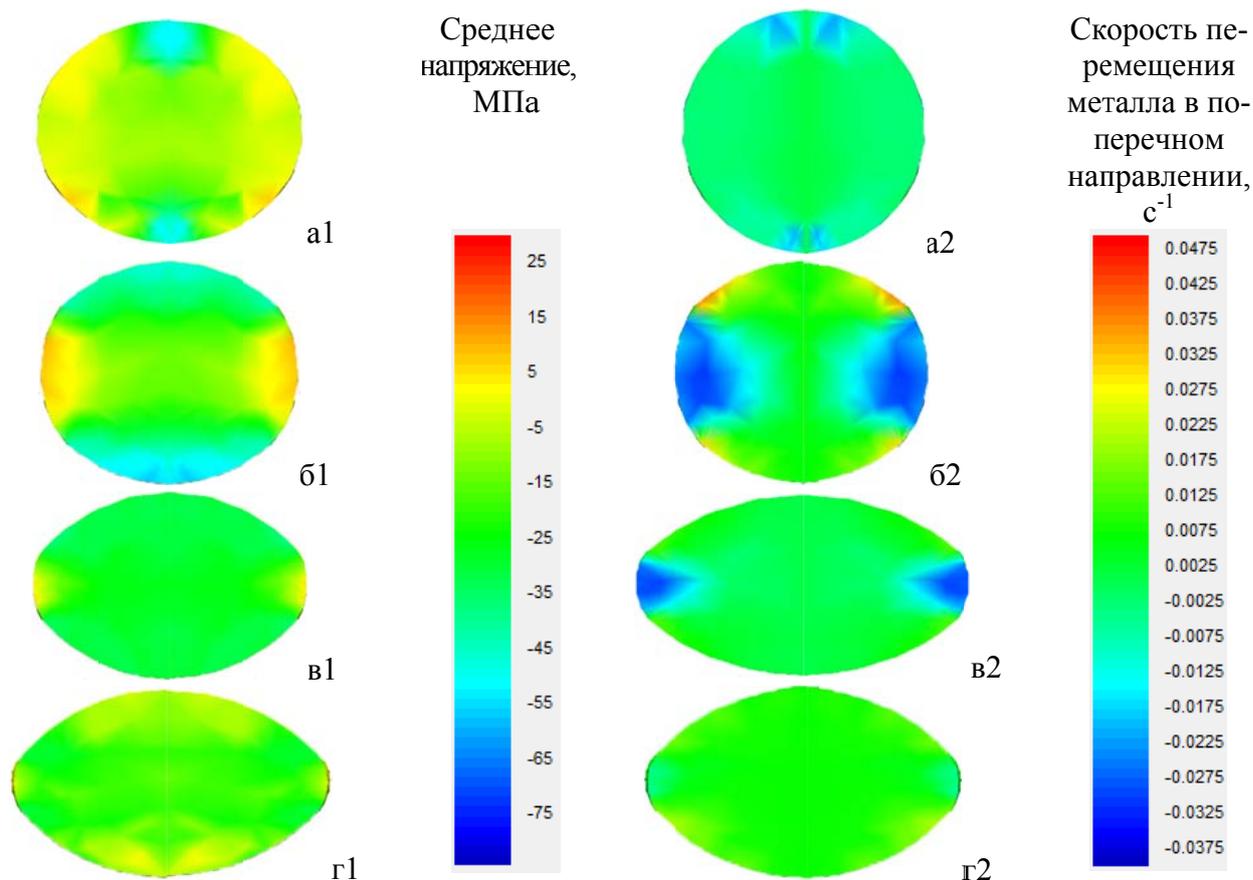


Рис. 9. Поля среднего напряжения(1) и скорости перемещения металла в поперечном направлении (2) в поперечных сечениях очага деформации при вальцовке цилиндрических заготовок \varnothing 65 мм с ВЗ при кривизне овальных калибров $i = 1,35$:

а – начало ОД (сечение А-А, рис. 7); б – 1/3 ОД (сечение Б-Б, рис. 7); в – 2/3 ОД (сечение В-В, рис. 7); г – конец ОД (сечение Д-Д, рис. 7).

Анализ рис. 8–9 показывает, что в процессе деформации зона, которая не контактирует с инструментом, имеет отличные от него скорости деформации и напряжения. Вначале ОД – скорость и сопротивление деформации больше в слоях, контактирующих с инструментом (рис. 8), также в поверхностных слоях возникают высокие растягивающие напряжения (рис. 9). С увеличением степени деформации поверхностные слои давят в месте перехода металла от инструмента во ВЗ, заставляя ее деформироваться быстрее. Эти зоны обладают сжимающим напряжением (рис 9, б, в) и металл во ВЗ смещается в поперечном направлении к заготовки со значительно большей скоростью. ВЗ при образовании установившегося течения в очаге деформации заставляют металл центра заготовки смещаться в сторону опережения.

На рис. 10 показаны зависимости скорости деформации, сопротивления деформации, среднего напряжения и скорости перемещения металла в поперечном направлении во внеконтактной зоне, от длины очага деформации $L_{ОД}$. Проведенные расчеты, показали что в заготовках без ВЗ, зона, не контактирующая с инструментом образуется только к середине ОД. Во второй половине очага деформации, во ВЗ наблюдается самая высокая скорость деформации и скорость смещения ВЗ к центру заготовки (рис. 10, а, г), при этом во ВЗ максимально возрастает сопротивление деформации (рис. 10, б). Сравнение параметров заготовки во внеконтактной зоне для заготовок с ВЗ (рис. 10, 1) и без ВЗ (рис. 10, 2), позволяет сделать вывод, что основной причиной большего уширения при вальцовке в овальных калибрах заготовок без ВЗ заключается в отсутствии зоны, которая препятствует перемещению металла в поперечном направлении.

Для дальнейшей оценки влияния наличия ВЗ на уширение и размеры очага деформации, исследуем различные поля параметров заготовки в поперечном сечении В-В (рис. 7), находящемся во второй половине ОД, на расстоянии 15–20 мм от выхода из овальных калибров.

На рис. 11 представлены зависимости полей температуры и скорости – в зависимости от кривизны овальных калибров i . На рис. 14 представлены графики зависимости изменения во внеконтактной зоне температуры, скорости деформации, сопротивления деформации, среднего напряжения, скорости перемещения металла в поперечном направлении и работы деформации от кривизны овальных калибров i .

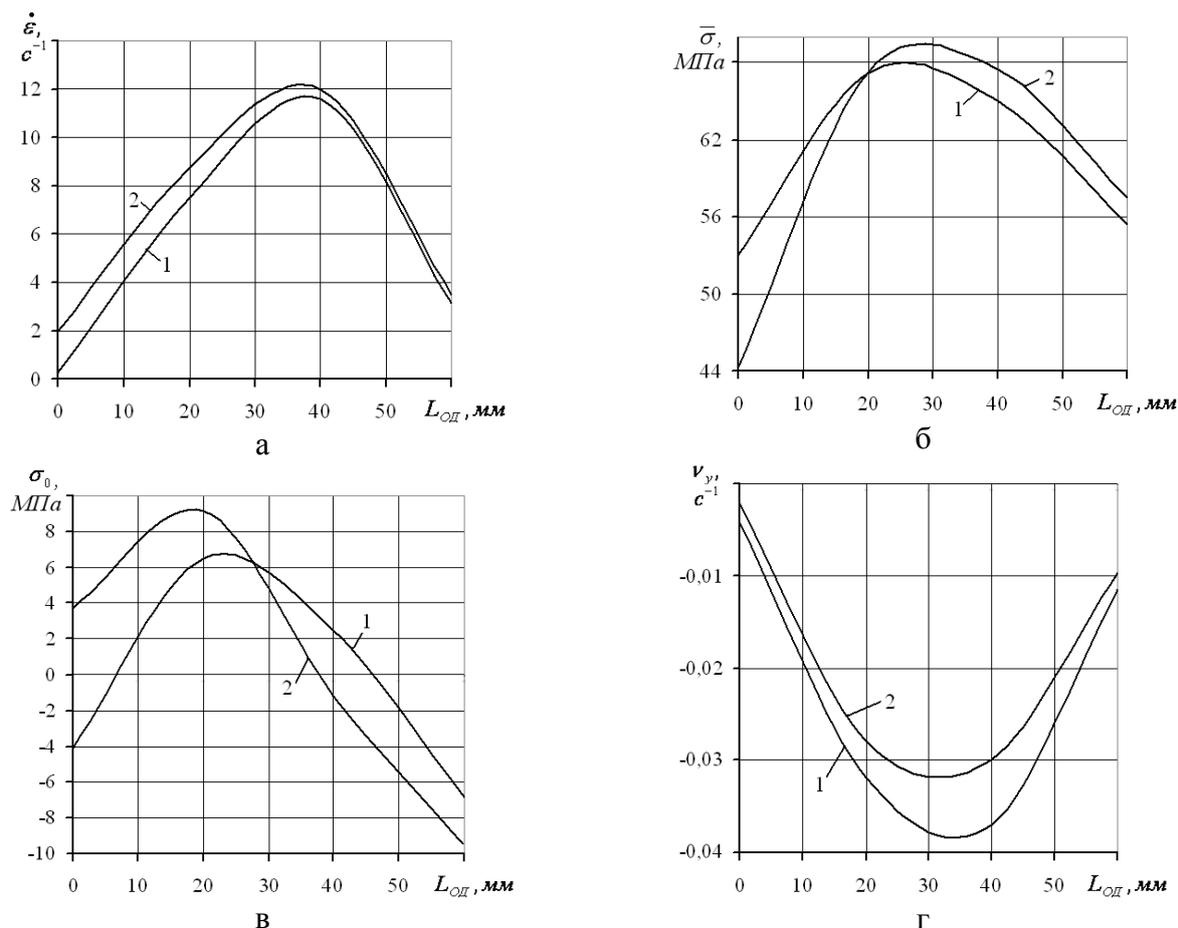


Рис. 10. Зависимости величины параметров процесса вальцовки цилиндрических заготовок с ВЗ (1) и без ВЗ (2) в области внеконтактной зоны от длины очага деформации L_{OD} :

а – скорость деформации, б – сопротивление деформации, в – среднее напряжение, г – скорость в поперечном направлении.

Характер распределения температуры в поперечном сечении при различной кривизне калибров показан на рис. 11, 1 и соответствует характеру распределения интенсивности деформации. В месте контакта инструмента с заготовкой происходит значительное снижение температуры за счет теплоотдачи заготовки инструменту. С другой стороны, с ростом кривизны калибров, наблюдается значительный рост температуры более чем на 20 °С (рис. 12, а). В заготовке с ВЗ при $i \leq 1,4$ во внеконтактной области температура меньше чем в заготовках без ВЗ, это обусловлено меньшей интенсивностью деформаций во внеконтактных зонах и показывает, что внеконтактная область окончательно формируется только при $i \approx 1,4$. При $i > 1,4$ у заготовок без ВЗ, сформированные ВЗ замедляют скорость деформации и температура в них становится меньше, чем в заготовках с ВЗ (рис. 12, а).

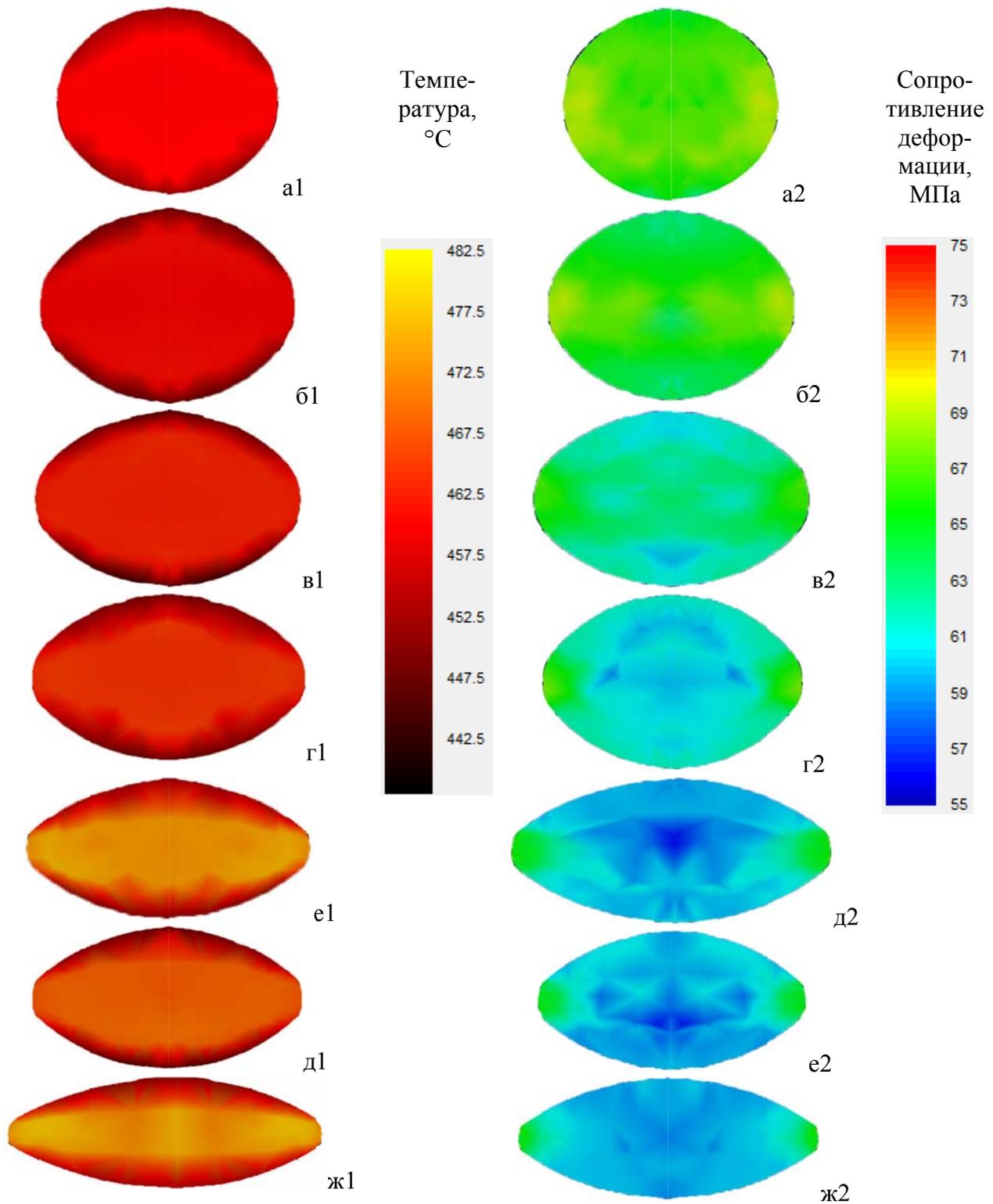


Рис. 11. Поля температуры (1) и сопротивление деформации (2) в поперечных сечениях второй половины очага деформации при вальцовке цилиндрических заготовок \varnothing 65 мм с ВЗ (1) и без ВЗ (2) при кривизне овальных калибров i :

а – 1,08; б – 1,16; в – 1,23; г – 1,35; д – 1,52; е – 1,65; ж – 2,01

Наличие в заготовках внеконтактных зон отображается на полях сопротивления деформации в виде боковых областей с более высоким сопротивлением (рис 11, 2).

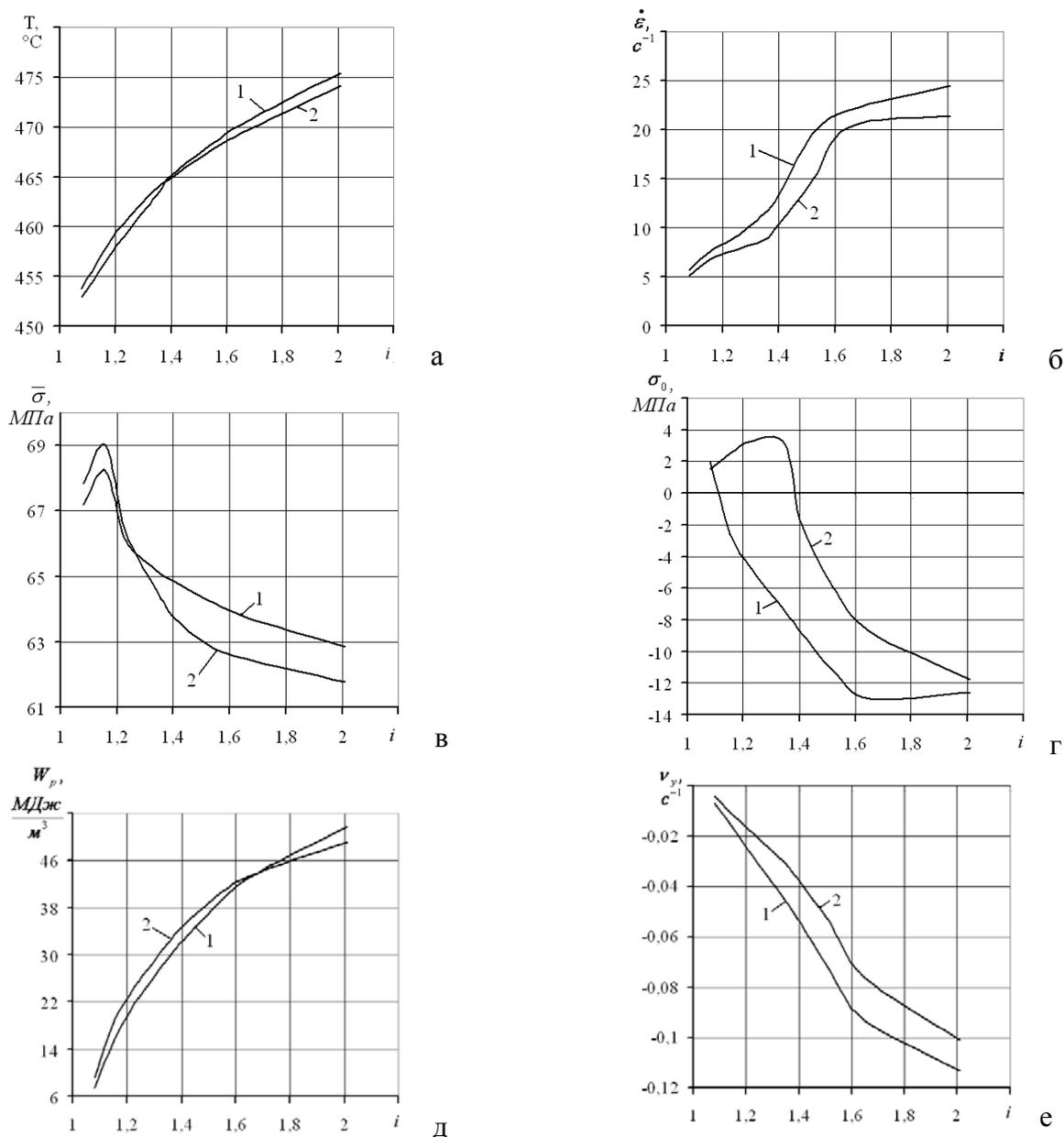


Рис. 12. Зависимости величины параметров процесса вальцовки цилиндрических заготовок с ВЗ (1) и без ВЗ (2) во внеконтактной зоне второй половины очага деформации:

а – температура; б – скорость деформации, в – сопротивление деформации, г – среднее напряжение, д – работа деформации, е – скорость в поперечном направлении.

Зависимости (рис. 12) позволяют объяснить поведение коэффициента влияния ВЗ (рис. 4) и достижения им максимума при $i \approx 1,25$. При этой кривизне калибра при образовании участка с ВЗ в заготовках без ВЗ, скорость деформации, образующаяся ВЗ становится значительно ниже по сравнению со скоростью деформации в заготовке с уже имеющейся ВЗ (рис. 12 б, е). При $i \approx 1,25$, в заготовках с ВЗ и без ВЗ наблюдается одинаковое сопротивление деформации, которое при увеличении кривизны калибра быстрее снижается у заготовок без ВЗ (рис. 12, в). Из рис. 12, г, видно при небольших деформациях, в заготовке с ВЗ во внеконтактной зоне увеличиваются сжимающие напряжения, а в заготовках без ВЗ при формировании внеконтактной зоны растут растягивающие напряжения. При $i \approx 1,25$, разница в напряжениях достигает максимума, а при $i > 1,4$ в заготовке без ВЗ во внеконтактных напряжения также становятся сжимаемыми, что говорит об окончании процесса формирования внеконтактной зоны.

ВЫВОДЫ

1. Для теоретического исследования влияния внеконтактных зон на уширение, проведено компьютерное моделирование процесса вальцовки с применением программы «QForm» для моделирования процессов обработки давлением методом конечно-элементного анализа. Исследования проводились на образцах диаметром 25, 35, 50 и 65 мм из алюминиевого сплава АК6 в овальных калибрах с коэффициентами вытяжки $\lambda_{ов} = 1,15 \div 2,55$.

2. Установлено, что для рекомендуемых интервалов вальцовки, размер линейного $\delta_{\Delta b}$ и объемного $\delta_{F_{ум}/F_{см}}$ показателей уширения снижается при увеличении коэффициента вытяжки с 70 до 5 %.

3. Для расчетов коэффициента влияния ВЗ $K_{ум_{ов}}^{B3}$ на уширение при вальцовке цилиндрических заготовок в овальных калибрах, была выведена формула зависимости $K_{ум_{ов}}^{B3}$ от кривизны овальных калибров $i = R_{ов}/R_{заг}$ и диаметра заготовки D_0 мм.

4. В формулу для определения уширения при вальцовке заготовок круглого сечения в овальных калибрах, был внесен поправочный коэффициент для учета влияния внеконтактных зон.

5. Расчетным путем определено влияние распределения полей температуры, скорости и сопротивления деформации, среднего напряжения и работы деформации, скорости перемещения металла в поперечном направлении и изменения координатной сетки (лагранжевых линий) в зависимости от кривизны овальных калибров i , на различных участках очага деформации, при вальцовке заготовок с внеконтактными и без внеконтактных зон на уширение.

6. В заготовках без ВЗ, внеконтактная зона начинает свое формирование при $i \approx 1,1 \div 1,25$, что соответствует максимальному коэффициенту влияния ВЗ. При $i \approx 1,65 \div 2,0$ происходит окончательное формирование ВЗ и, внеконтактные зоны в заготовках без ВЗ становятся идентичными заготовкам с ВЗ.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Скрябин С. А. *Технология горячего деформирования заготовок из алюминиевых сплавов на ковочных вальцах* / С. А. Скрябин – Винница : О. Власюк, 2007. – 284 с.
2. Скрябин С. А. *Исследование методов аппроксимации зависимостей коэффициентов уширения и опережения при вальцовке в калибрах* / С. А. Скрябин, Д. С. Чайка. // *Обработка материалов давлением : сборник научных трудов*. – Краматорск : ДГМА, 2013. – № 3 (36), С. 64–67.
3. *QForm3D – конечно-элементная программа для расчета процессов пластической деформации металлов и сплавов*, ©1991-2014, ООО «КванторФорм». – [Электронный ресурс] – Режим доступа : www.qform3d.com.
4. Скрябин С. А. *Влияние формы и размеров внеконтактных зон вальцуемых заготовок на уширение*. / С. А. Скрябин, Д. С. Чайка. // *Вестник национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт»*. *Машиностроение*. – 2007. – № 50. – С. 192–199.
5. Скрябин С. А. *Влияние внеконтактных зон на уширение при вальцовке цилиндрических заготовок в гладких валках* / С. А. Скрябин, В. Л. Калюжский, Д. С. Чайка. // *Научный Вестник Донбасской государственной машиностроительной академии : сборник научных трудов*. – Краматорск : ДГМА, 2008. – № 3 (14E). – С. 147–155.
6. Вуколов Э. А. *Основы статистического анализа Практикум по статистическим методам и исследованию операций с использованием пакетов STATISTIKA и EXCEL: учебное пособие*. – 2-е изд., испр. и доп. / Э. А. Вуколов. – М. : ФОРУМ, 2008. – 464 с. – (Высшее образование).
7. STATISTIKA. *Официальное руководство*. Том 1, 3. Copyright©StatSoft, 1995.
8. Дрейпер Н. *Прикладной регрессионный анализ: В 2-х кн.* / пер. с англ. Н. Дрейпер, Г. Смит. – 2-е изд., перераб. и доп. – М. : Финансы и статистика, 1986.
9. Шашков Б. В. *Прикладной регрессионный анализ. Многофакторная регрессия: Учебное пособие* / Б. В. Шашков – Оренбург : ГОУ ВПО ОГУ, 2003. – 363 с.
10. Скрябин С. А. *Определение уширения при вальцовке заготовок из алюминиевых сплавов, в условиях приближения к изотермическим*. / С. А. Скрябин, Л. В. Швец // *Вестник национального технического университета Украины «Киевский политехнический институт»*. *Машиностроение*, 2009. – № 55. – С. 106–112.