



АНАЛИЗ СХЕМЫ ТЕЧЕНИЯ МЕТАЛЛА В ПРОЦЕССАХ ДЕФОРМИРОВАНИЯ ПЛОСКОЙ ЗАГОТОВКИ

Соломонов К.Н.¹, Тищук Л.И.¹, Бахаев К.В.²

¹ Филиал Ростовского государственного университета путей сообщения, Воронеж, Россия

² Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия

Аннотация. Рассмотрена задача по созданию специализированного программного комплекса, способного моделировать картину течения металла в процессах горячей деформации плоских профилированных заготовок. Даны оценка традиционным кинематическим схемам течения металла – нормальной и радиальной. Результаты виртуального эксперимента, полученные с использованием программного комплекса DEFORM, который хорошо зарекомендовал себя при решении задач пластического формоизменения, показали, что при любых параметрах процесса осадки реальной является «промежуточная» кинематическая схема течения металла, которая состоит из зон течения по нормали к контуру и зон радиального течения. Предполагается, что для создания алгоритма расчета параметров осадки плоской заготовки допустимой можно считать нормальную кинематическую схему течения металла в условиях трения, которые сопровождают процессы горячей объемной штамповки и ковки алюминиевых сплавов при наличии смазки. На основании этого допущения разработан программный комплекс EQUI, который позволяет моделировать картину течения металла по плоскости контакта инструмента и заготовки. Для компьютерного моделирования пространственной эпюры контактных напряжений и, как следствие, линий раздела течения металла предложена система автоматизированного проектирования КОМПАС, с помощью которой задача в напряжениях может быть сведена к задаче в перемещениях. Это возможно благодаря тому, что проекция твердотельной модели, которая представляет собой аналог пространственной эпюры контактных напряжений на плоскость контакта инструмента и заготовки, позволяет получить изображение линии раздела течения металла на контактной плоскости. Сравнение результатов, полученных в КОМПАС и EQUI, показывает хорошее совпадение.

Ключевые слова: плоская заготовка, деформация, осадка, картина течения металла, пространственная эпюра контактных напряжений, коэффициент трения, программный комплекс

© Соломонов К.Н., Тищук Л.И., Бахаев К.В., 2022

Для цитирования

Соломонов К.Н., Тищук Л.И., Бахаев К.В. Анализ схемы течения металла в процессах деформирования плоской заготовки // Вестник Магнитогорского государственного технического университета им. Г.И. Носова. 2022. Т. 20. №4. С. 58-66. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-58-66>



Контент доступен под лицензией Creative Commons Attribution 4.0 License.
The content is available under Creative Commons Attribution 4.0 License.

ANALYSIS OF THE METAL FLOW DIAGRAM IN FLAT BAR FORMING PROCESSES

Solomonov K.N.¹, Tishchuk L.I.¹, Bakhaev K.V.²

¹ Branch of Rostov State Transport University, Voronezh, Russia

² Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia

Abstract. The paper describes the development of a specific software suite applied to simulate a metal flow chart in hot forming processes of shaped flat bars. It contains an assessment of conventional kinematic metal flow diagrams: normal and radial ones. A virtual experiment conducted in DEFORM, showing good results in plastic forming, demonstrated that at any parameters of an upsetting process a real diagram was an “intermediate” metal flow kinematic diagram, consisting of zones of the flow along the normal to the circuit and zones of a radial flow. To develop an algorithm of calculating the flat bar upsetting parameters, it is assumed to consider as acceptable a normal kinematic diagram of a metal flow in friction conditions accompanying hot die forging and pressing of aluminum alloys with lubrication. Following this assumption, EQUI software suite was developed to simulate a metal flow chart along the contact plane of the tool and the bar. To carry out a computer simulation of a 3D contact stress drawing and, as a consequence, boundary lines of the metal flow, it is suggested to use KOMPAS automated design system, where a stress problem may be converted to a displacement problem. It is possible due to a projection of a solid model representing a similar 3D contact stress drawing on a plane of the contact between the tool and the bar, giving an image of the boundary line of the metal flow on the contact plane. The comparison of the results in KOMPAS and EQUI shows a good agreement.

Keywords: flat bar, forming, upsetting, metal flow chart, 3D contact stress drawing, friction coefficient, software suite

For citation

Solomonov K.N., Tishchuk L.I., Bakhaev K.V. Analysis of the Metal Flow Diagram in Flat Bar Forming Processes. *Vestnik Magnitogorskogo Gosudarstvennogo Tekhnicheskogo Universiteta im. G.I. Nosova* [Vestnik of Novosibirsk Magnitogorsk State Technical University]. 2022, vol. 20, no. 4, pp. 58-66. <https://doi.org/10.18503/1995-2732-2022-20-4-58-66>

Введение

Для моделирования картины течения металла по полотну плоской заготовки в условиях горячей деформации металлических образцов, в частности в процессах ковки и объемной штамповки, когда значительное влияние на формообразование поковки оказывает трение, наиболее пригодной можно считать деформационную схему осадки. В этом случае для визуализации картины течения металла при деформировании плоской заготовки в условиях плоской деформации существенное значение имеет построение схемы течения металла, которая наиболее точно описывала бы особенности течения металла по полотну заготовки.

Оценка пригодности предельных кинематических схем течения металла

В «классической» литературе [1] представлены две предельные схемы течения металла по полотну образца при осадке плоской прямо-

угольной заготовки, описывающие распределение потоков металла на контактной поверхности, которые получили название «нормальная и радиальная кинематические схемы течения металла» (рис. 1). В соответствии с нормальной кинематической схемой течения металла линии тока направлены по нормали к контуру заготовки, благодаря чему прямоугольная пластина в ходе осадки должна превращаться в многоугольник. В соответствии с радиальной кинематической схемой течения металла почти все линии тока направлены вдоль радиусов некоторой окружности, под острым углом к контуру заготовки, и в процессе деформирования прямоугольная пластина, увеличиваясь в размерах, не должна менять своей формы. Ссылаясь на работы предшественников и ряда отечественных и зарубежных исследователей, можно утверждать, что вид кинематической схемы течения металла главным образом, но не только, зависит от коэффициента (показателя) трения. При этом нормальная кинематическая схема течения ме-

тала характерна для случая, когда трение максимальное, а радиальная – когда трение полностью отсутствует. Очевидно, что на практике оба варианта нереализуемы.

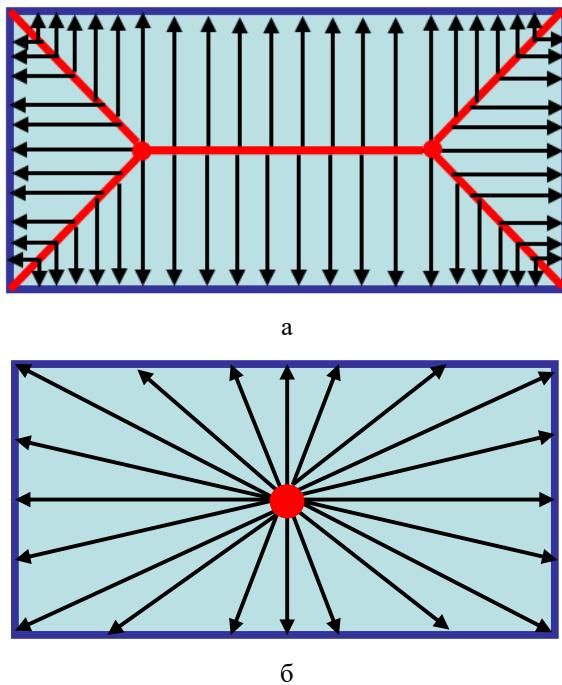


Рис. 1. Предельные схемы течения металла:
а – нормальная кинематическая схема;
б – радиальная кинематическая схема
Fig. 1. Limit metal flow diagrams: a is a normal kinematic diagram; б is a radial kinematic diagram

В реальных процессах осадки прямоугольник деформируется не в многоугольник, а в эллипс, а затем в окружность, и наблюдаются так называемые «ушки» – заостренные выступы в угловых зонах заготовки. Указанные результаты получены в натурных экспериментах [2]. Аналогичные эксперименты проводились на сравнительно тонких стальных и свинцовых образцах [3], отношение толщины которых к линейному размеру в плане было равно приблизительно 0,1. Описанные эксперименты, проводившиеся на протяжении многих лет разными исследователями, свидетельствуют о том, что в действительности имеет место некоторая «промежуточная» кинематическая схема течения металла, что согласуется с предположением, высказанным в [1], где описаны предельные случаи.

Попытки устраниТЬ противоречивость нормальной и радиальной схем и приблизить их к реальным условиям формообразования поковок предпринимали и другие исследователи [4]. Ими высказывалось мнение, что в начальный момент деформирования имеет место нормальная кинематическая схема течения металла, а затем по ходу осадки на последующих этапах – «псевдоно нормальная», которая сочетает в себе элементы нормальной и радиальной кинематических схем течения металла: линии раздела течения металла расположены так же, как в нормальной, но линии тока направлены вдоль радиусов дуг некоторых окружностей, положение которых определяется граничными условиями. Тогда все-таки схему течения металла можно считать нормальной, но по отношению не к действительному, а к условному контуру.

Существенным отличием от рассматриваемых в этой статье разработок является то, что авторы указанной идеи исследовали влияние не трения, а степени деформации на формообразование поковки. Казалось бы, при таком подходе нормальная схема не может использоваться, так как непонятно, что считать начальным моментом деформирования и когда он заканчивается. Однако оказалось, что именно нормальная схема дает возможность пусть и с погрешностью, но быстро оценить (сделать экспресс-анализ) картину течения металла, что бывает немаловажно в производственных условиях, когда в отдельных случаях можно пожертвовать точностью расчетов ради скорости принятия решений. Следует также отметить, что нормальная схема течения металла сравнительно легко поддается формализации и дает возможность получить несложный алгоритм построения картины течения металла и реализовать его в виде программного комплекса, позволяющего моделировать формообразование заготовки.

Компьютерное моделирование с помощью разработанного программного комплекса

Для визуализации реальной кинематической схемы течения металла, как обычно в подобных случаях, желательно провести натурные эксперименты. Упомянутые выше эксперименты не позволяют выявить поле скоростей или перемещений, а значит, и картину течения металла по всей площади контакта заготовки. Задача визуализации картины течения металла с помощью физического моделирования представляется весьма сложной. Если взять во внимание неизбежные временные и финансовые затраты на подготовку и проведение эксперимента, то задача и вовсе становится малопривлекательной. Наиболее продуктивный выход из данной ситуации – замена натурного эксперимента виртуальным, что в сегодняшних условиях высокоразвитой базы компьютерной техники и программного обеспечения весьма продуктивно. Компьютерное моделирование уже давно

является эффективным и высокотехнологичным способом моделирования, объединяющим численные и графические методы построений.

Прежде чем перейти к описанию разработанного авторами программного комплекса, имеет смысл дать небольшую классификацию способов моделирования. Все способы компьютерного моделирования можно условно разделить на две категории: способы моделирования процессов и способы моделирования объектов. К способам моделирования процессов можно отнести САМ/САЕ и другие вычислительные системы, позволяющие моделировать процесс в конкретной предметной области, которые называют прикладными. В области обработки металлов давлением к ним относятся DEFORM, FORGE, ANSYS, SPLEN и др. К способам моделирования объектов относятся CAD-системы, позволяющие моделировать геометрические объекты (от примитивов до сложных криволинейных поверхностей). Кроме этого, такие системы дают возможность проектировать сложные машины и механизмы и готовить для них конструкторскую документацию. Примерами указанных CAD-систем являются COMPAS, AutoCAD, SolidWorks, Unigraphics.

Сочетанием способов моделирования указанных двух категорий может служить разработанный авторами программный комплекс EQUI (рис. 2), реализованный в среде визуального программирования DELPHI, базирующийся на нормальной кинематической схеме течения металла.

Программный комплекс EQUI [5-7], предназначенный для моделирования картины течения металла и пространственной эпюры контактных напряжений в процессах осадки, которая сопутствует течению металла по зеркалу гравюры штампа при объемной штамповке поковок из плоских заготовок, состоит из трех основных

программных блоков, обеспечивающих решение статической, кинематической и динамической задач. Решение статической задачи хорошо согласуется с принципом кратчайшей нормали, в соответствии с которым металл по плоскости контакта течет вдоль линий тока, направленных ортогонально контуру поковки. В этом случае линия раздела течения металла является геометрическим местом точек, равноудаленных от контура заготовки, или эквидистантой. Решение кинематической задачи базируется на принципе наименьшего периметра, благодаря которому может быть принята псевдонормальная схема течения металла, характеризующаяся тем, что линии тока направлены ортогонально к некоторой условной кривой, являющейся линией уровня на поверхности контактных напряжений. Тогда металл течет вдоль радиусов некоторой окружности, называемой условным контуром.

Динамическая задача сводится к построению пространственной эпюры контактных напряжений, которая представляет собой сочетание конических и гранных поверхностей. Причем в проекции на плоскость контакта ребра этой поверхности являются линиями раздела течения металла, а линии ската – линиями тока.

В программном комплексе EQUI, который относится к способам моделирования процессов и объектов, в отличие от предыдущих версий, предусмотрена в том числе возможность построения пространственной эпюры контактных напряжений на основе плоской картины течения металла. То есть решена достаточно сложная в плане формализации задача построения пространственной эпюры контактных напряжений за счет «вспухания» картины течения металла, расположенной на плоскости контакта, до объемной фигуры (см. рис. 2).

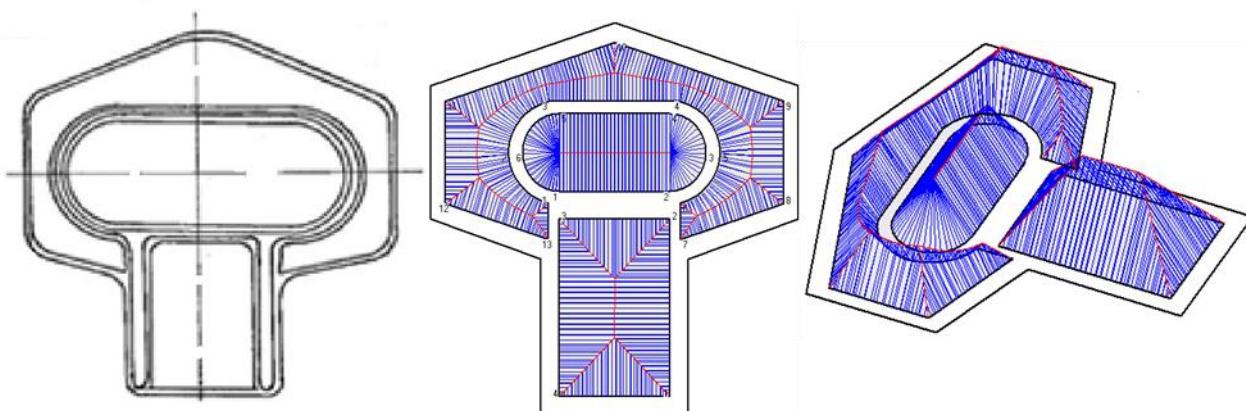


Рис. 2. Чертеж детали и результаты моделирования в программном комплексе EQUI
Fig. 2. Drawing of the part and simulation results in EQUI software suite

Моделирование эпюры контактных давлений с помощью КОМПАСа

В отдельных случаях моделирование нормальной кинематической схемы течения металла, а вместе с ней и пространственной эпюры контактных напряжений возможно одним из способов моделирования объектов. Самый простой из них, но достаточно наглядный, – отечественный программный продукт КОМПАС. Надо отметить, что кажущаяся простота этого графического пакета объясняется следующим: во-первых, один из приемов получения твердотельных моделей в КОМПАСе является «выдавливание», которое представляет собой построение поверхности одинакового ската (а именно ее и представляет собой пространственная эпюра контактных напряжений) на заданном контуре; во-вторых, простота с точки зрения пользователя реализации рассматриваемых построений в КОМПАСе достигнута за счет высокой квалификации разработчиков, что также характерно для разработчиков EQUI.

Для моделирования пространственной эпюры контактных давлений и линии раздела течения металла программный продукт КОМПАС достаточно удобен тем, что, во-первых, он прост в освоении; во-вторых, выдавливание твердотельной модели на плоском контуре происходит так, что все образующие получаемой поверхности наклонены под одним углом к плоскости контура. Следовательно, твердотельная модель – это поверхность одинакового ската, аналогичная

по форме пространственной эпюре контактных давлений. На плоском чертеже проекция этой модели на плоскость контакта отображает линию раздела течения металла.

С минимальными временными и трудозатратами в КОМПАСе можно получить решение задачи построения твердотельной модели для двух- и трехсвязного контура, чему соответствует визуализация пространственной эпюры контактных напряжений при осадке круглой пластины с круглым вырезом и прямоугольной пластины с двумя круглыми вырезами (**рис. 3**).

Наглядное изображение пространственной эпюры контактных напряжений позволяет оперативно выбирать потребные усилия пресса для сложноконтурных поковок. Очевидно, что для деформирования пластины с вырезом требуется гораздо меньше усилий, чем для сплошной пластины. Сравнение результатов моделирования в КОМПАСе и EQUI дает хорошее совпадение.

Однако даже для самых простых односвязных контуров не всегда удается в КОМПАСе построить твердотельную модель полностью, так как в большинстве случаев невозможно «вытянуть» (выдавить) до самого верха такую поверхность. Возможности твердотельного моделирования поверхностей в SolidWorks гораздо шире, но и эта компьютерная система не всегда позволяет получить решение. Более совершенные и сложные CAD-системы дают дополнительные возможности в этом плане.

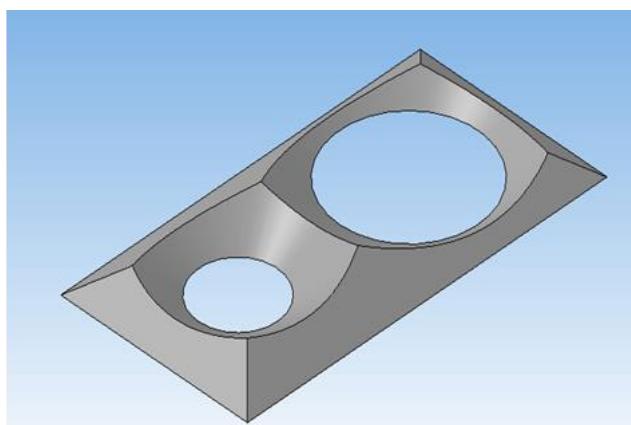
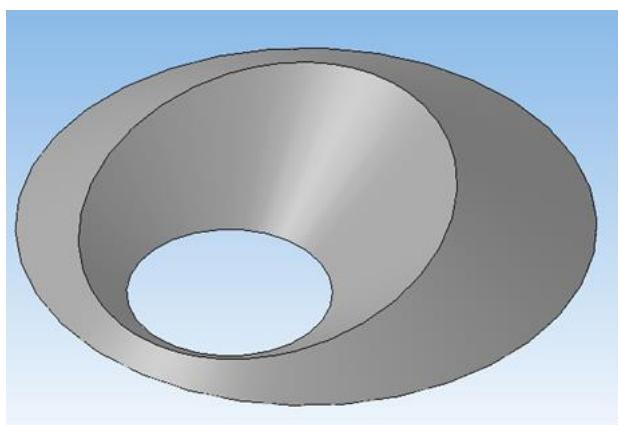


Рис. 3. Результаты моделирования в КОМПАСе
Fig. 3. Simulation results in KOMPAS

Виртуальный эксперимент по осадке пластин

Для проведения виртуальных экспериментов применялся программный комплекс DEFORM, позволяющий моделировать все основные процессы, применяемые в обработке металлов давлением (ковка, штамповка, прокатка, прессование и др.).

Для исследования влияния коэффициента трения на кинематическую схему течения металла проведены виртуальные эксперименты по осадке прямоугольной в плане пластины с различным соотношением размеров сторон и толщины из сплава Aluminium 3003 (аналог сплава АМц). Использовалась заготовка с размерами в плане 100×50 мм, толщиной 5 мм, при температуре разогрева заготовки 380°C и штампа 420°C, с учётом теплообмена со средой. Эксперимент по осадке проводился в условиях, максимально приближенных к реальным.

В результате получены поля скоростей перемещения частиц металла в плоскости контакта деформируемого образца и инструмента, которые позволяют визуализировать кинематическую схему течения металла (рис. 4). Для корректности сравнения результатов компьютерного моделирования при различных коэффициентах трения поля скоростей перемещения частиц показаны при одинаковой степени деформации, а именно 40%.

Результаты виртуального эксперимента позволяют сделать вывод, что при коэффициенте трения, близком к минимальному, кинематическую схему течения металла можно считать радиальной; при коэффициенте трения, близком к максимальному, кинематическая схема течения металла близка к нормальной (сравните с рис. 1); при трении, близком к промышленным условиям, наблюдается некоторая «промежуточная» кинематическая схема течения металла.

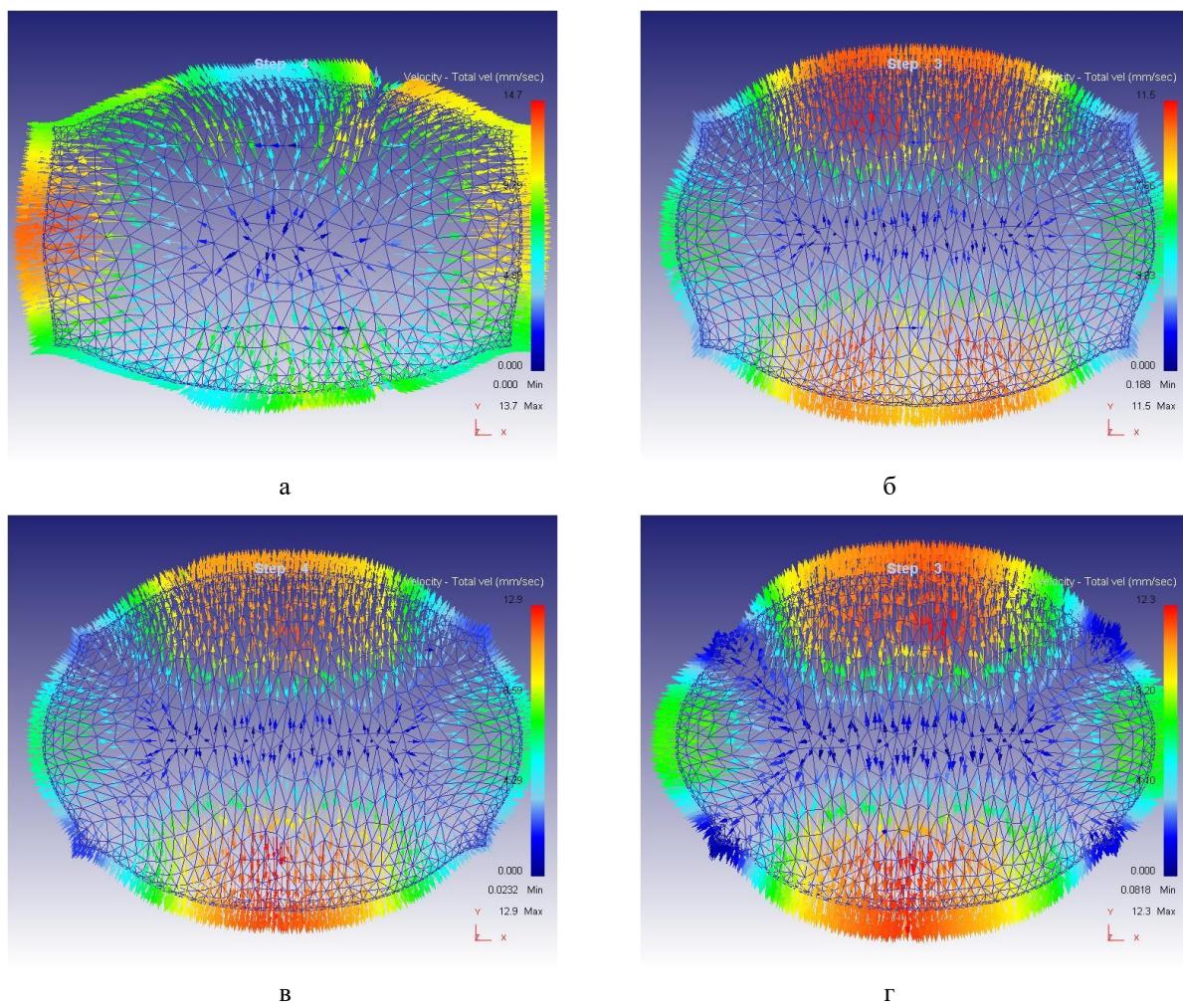


Рис. 4. Картина течения металла, полученная в DEFORM, для коэффициентов трения:
а – $k = 0,09$; б – $k = 0,4$; в – $k = 0,8$; г – $k = 0,99$

Fig. 4. Metal flow chart simulated in DEFORM for friction coefficients:
a is $k = 0,09$; b is $k = 0,4$; v is $k = 0,8$; г is $k = 0,99$

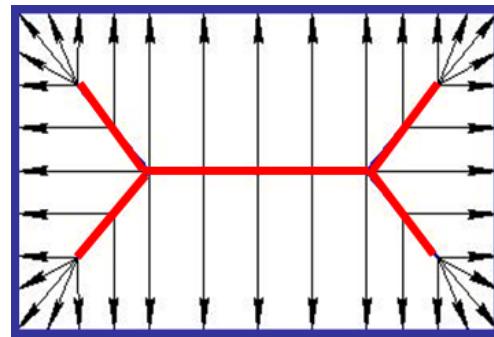
Также проводились исследования, как кинематическая схема течения металла зависит от ряда других факторов. Для определения зависимости кинематической схемы течения металла от вида металла произведена осадка образцов из сплавов АМц, Ст 35 и идеально пластичного материала. Оказалось, что для разных сплавов кинематическая схема течения металла выглядит приблизительно одинаково.

В ходе виртуальных экспериментов, выполненных с помощью программного комплекса DEFORM, выяснилось, что с увеличением толщины заготовки кинематическая схема течения металла стремится к радиальной независимо от показателя трения. Для толстых заготовок скорость течения металла значительно снижается по сравнению с тонкими заготовками. Для тонких заготовок показатель трения является подавляющим фактором при выборе кинематической схемы течения металла.

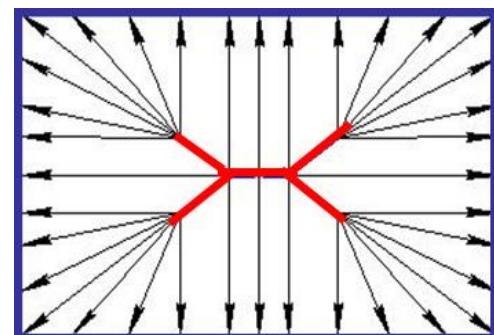
Температурно-скоростные режимы деформации металлических материалов в зависимости от их структуры и реологического состояния показывают, что такие сплавы можно отнести к средне- и мелкозернистым, что соответствует большинству конструкционных сплавов, применяемых в промышленности для ковки и штамповки. Важно отметить, что реологические свойства таких металлов отличаются в незначительной мере друг от друга ввиду равных возможностей межзеренного скольжения. Для таких металлов скольжение между зернами составляет приблизительно 5% от всей деформации. В основном деформирование происходит за счет изменения формы зерен. Следовательно, такие металлы можно считать в значительной мере пластическими.

Анализ результатов компьютерного моделирования

По результатам компьютерного моделирования (виртуального эксперимента) можно предположить, что при любых параметрах процесса осадки реальной является «промежуточная» кинематическая схема течения металла (рис. 5), которая состоит из зон течения по нормали к контуру и зон радиального течения. При этом можно предполагать, в том числе и на основании результатов виртуального эксперимента, что чем меньше коэффициент (показатель) трения, тем короче линии раздела течения металла, меньше их «разветвленность», и тем длиннее линии тока, а следовательно, кинематическая схема течения металла ближе к радиальной. Чем больше коэффициент (показатель) трения, тем кинематическая схема течения металла ближе к нормальной.



a



б

Рис. 5. «Псевдонормальная» схема течения металла:
а – при трении, близком к максимальному;
б – при трении, близком к минимальному

Fig. 5. Pseudonormal metal flow diagram:
a is when friction is close to a maximum value;
b is when friction is close to a minimum value

Тогда можно утверждать, что различные вариации промежуточной кинематической схемы течения металла служат некоторой масштабной моделью закона наименьшего сопротивления, при котором радиальная и нормальная схемы являются ее предельными случаями.

Поскольку остается ряд недостаточно изученных областей, требующих внимательного рассмотрения в плане влияния на результаты вышеописанных исследований, следует учесть разработки, касающиеся макроструктурных изменений в процессах пластической деформации и смежных проблем в металургической сфере [8-18].

Заключение

1. В результате оценки предельных кинематических схем течения металла можно утверждать, что для описания течения металла в реальных условиях наиболее обоснованной является «промежуточная» кинематическая схема течения металла, основой для которой служит «псевдонормальная» схема течения металла, в то время как радиальная и нормальная схемы могут считаться ее предельными случаями.

2. На основании виртуального эксперимента получено подтверждение обоснованности использования псевдонормальной схемы течения металла для описания течения металла по плоскости заготовки в процессах осадки.

3. Продемонстрированы возможности разработанного программного комплекса, позволяющего моделировать картину течения металла в процессах осадки.

Список источников

1. Сторожев М.В., Попов Е.А. Теория обработки металлов давлением. М.: Машиностроение, 1977. 423 с.
2. Sobbe C. Beiträge zur Technologie des Schmiedepressens. Werkstattstechnik, 1908, no. 9, pp. 457-471.
3. Тарновский И.Я., Поздеев А.А., Ганаго О.А. Деформации и усилия при обработке металлов давлением. М.: Машгиз, 1959. 304 с.
4. Соломонов К.Н., Костарев И.В., Абашкин В.П. Моделирование процессов объемной штамповки и ковки плоских заготовок. М.: Издательский дом МИСиС, 2008. 128 с.
5. Solomonov K. Development of software for simulation of forming forgings. Procedia Engineering, 2014, no. 81, pp. 437-443.
6. Solomonov K., Tishchuk L., Fedorin N. Simulation of forming a flat forging. Journal of Physics: Conf. Series, 2017, vol. 918, 012038.
7. Solomonov K.N., Tishchuk L.I., Lezhnev S.N., Listrov E.A. Simulation of upsetting process using kinematic schemes of metal flow. Journal of Materials Science and Engineering, 2020, vol. 971, 022041.
8. Gorbatyuk S.M., Morozova I.G., Naumova M.G. Color mark formation on a metal surface by a highly concentrated energy source. Metallurgist, 2016, vol. 60, no. 5-6, pp. 646-650.
9. Zakharov A.N., Gorbatyuk S.M., Borisevich V.G. Modernizing a press for making refractories. Metallurgist, 2008, vol. 52, no. 7-8, pp. 420-423.
10. Bast J., Gorbatyuk S.M., Kryukov I.Yu. Study of the temperature fields in the mold of a horizontal continuous caster. Metallurgist, 2011, vol. 55, no. 3-4, pp. 163-166.
11. Glukhov L.M., Gorbatyuk S.M., Morozova I.G. Effective laser technology for making metal products and tools. Metallurgist, 2016, vol. 60, no. 3-4, pp. 306-312.
12. Tarasov Yu.S., Radyuk A.G., Gorbatyuk S.M. Effect of the thermal insulation of the inner wall on the thermal condition of the air tuyeres of blast furnaces. Metallurgist, 2018, vol. 61, no. 9-10, pp. 745-750.
13. Gorbatyuk S.M., Morozova I.G., Naumova M.G. Development of the working model of production reindustrialization of die steel heat treatment. Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya [News of Universities. Ferrous Metallurgy], 2017, vol. 60, no. 5, pp. 410-415.
14. Artiukh V.G., Karlushin S.Yu., Sorochan E.N. Peculiarities of mechanical characteristics of contemporary polyurethane elastomers. Procedia Engineering, 2015, no. 117, pp. 938-944.
15. Artiukh V., Raimberdiyev T., Mazur V. Use of CAE-systems at evaluation of shock absorbers for metallurgical equipment. MATEC Web of Conferences, 2016, vol. 53, 01039.
16. Polyakov A.V., Mazur I.P. Research on the Effect of Reduction Distribution in Universal Stands on the Process of Metal Transition from Sides to the Center Line of Transfer Bar // Materials Science and Engineering: Conf. Series, 2019, vol. 718, 012014.
17. Мазур И.П., Ситников В.О., Шопин И.И. Повышение востребованности специалистов-металлургов для бизнеса: совершенствование образовательной программы // Черные металлы. 2020. № 8. С. 34-39.
18. Мазур И.П., Бобков Е.Б., Соловьев В.Н. Технология и производство листового проката. Взгляд на устремления и тенденции // Черные металлы. 2021. № 10. С. 4-12.

References

1. Storozhev M.V., Popov E.A. *Teoriya obrabotki metallov davleniem* [Theory of metal forming]. Moscow: Mashinostroenie, 1977, 423 p. (In Russ.)
2. Sobbe C. Beiträge zur Technologie des Schmiedepressens. Werkstattstechnik, 1908, no. 9, pp. 457-471.
3. Tarnovsky I.Ya., Pozdeev A.A., Ganago O.A. *Deformatsii i usiliya pri obrabotke metallov davleniem* [Strain and stress in metal forming]. Moscow: Mashgiz, 1959, 304 p. (In Russ.)
4. Solomonov K.N., Kostarev I.V., Abashkin V.P. *Modelirovanie protsessov obemnoi shtampovki i kovki ploskikh zagotovok* [Simulation of hot die forging and pressing of flat bars]. Moscow: Publishing House of Moscow Institute of Steel and Alloys, 2008, 128 p. (In Russ.)
5. Solomonov K. Development of software for simulation of forming forgings. Procedia Engineering, 2014, 81, 437-443.
6. Solomonov K., Tishchuk L., Fedorin N. Simulation of forming a flat forging. Journal of Physics: Conf. Series, 2017, 918, 012038.
7. Solomonov K.N., Tishchuk L.I., Lezhnev S.N., Listrov E.A. Simulation of upsetting process using kinematic schemes of metal flow. Journal of Materials Science and Engineering, 2020, 971, 022041.
8. Gorbatyuk S.M., Morozova I.G., Naumova M.G. Color mark formation on a metal surface by a highly concentrated energy source. Metallurgist, 2016, 60(5-6), 646-650.
9. Zakharov A.N., Gorbatyuk S.M., Borisevich V.G. Modernizing a press for making refractories. Metallurgist, 2008, 52(7-8), 420-423.
10. Bast J., Gorbatyuk S.M., Kryukov I.Yu. Study of the temperature fields in the mold of a horizontal continuous caster. Metallurgist, 2011, 55(3-4), 163-166.
11. Glukhov L.M., Gorbatyuk S.M., Morozova I.G. Effective laser technology for making metal products and tools. Metallurgist, 2016, 60(3-4), 306-312.

12. Tarasov Yu.S., Radyuk A.G., Gorbatyuk S.M. Effect of the thermal insulation of the inner wall on the thermal condition of the air tuyeres of blast furnaces. *Metallurgist*, 2018, 61 (9-10), 745-750.
13. Gorbatyuk S.M., Morozova I.G., Naumova M.G. Development of the working model of production reindustrialization of die steel heat treatment. *Izvestiya vuzov. Chernaya metallurgiya* [News of Universities. Ferrous Metallurgy], 2017, vol. 60, no. 5, pp. 410-415. (In Russ.)
14. Artiukh V.G., Karlushin S.Yu., Sorochan E.N. Peculiarities of mechanical characteristics of contemporary polyurethane elastomers. *Procedia Engineering*, 2015, 117, 938-944.
15. Artiukh V., Raimberdiyev T., Mazur V. Use of CAE-systems at evaluation of shock absorbers for metallurgical equipment. *MATEC Web of Conferences*, 2016, 53, 01039.
16. Polyakov A.V., Mazur I.P. Research on the effect of reduction distribution in universal stands on the process of metal transition from sides to the center line of transfer bar. *Materials Science and Engineering: Conf. Series*, 2019, 718, 012014.
17. Mazur I.P., Sitnikov V.O., Shopin I.I. Increasing a demand for specialists in metallurgy for business: improving the educational program. *Chernye metally* [Ferrous Metals], 2020, no. 8, pp. 34-39. (In Russ.)
18. Mazur I.P., Bobkov E.B., Solovev V.N. Technology and production of flat products. Overview of intentions and trends. *Chernye metally* [Ferrous Metals], 2021, no. 10, pp. 4-12. (In Russ.)

Поступила 18.10.2022; принята к публикации 12.12.2022; опубликована 22.12.2022
Submitted 18/10/2022; revised 12/12/2022; published 22/12/2022

Соломонов Константин Николаевич – доктор технических наук, профессор, филиал Ростовского государственного университета путей сообщения, Воронеж, Россия.
Email: konssol@list.ru.

Тищук Людмила Ивановна – кандидат технических наук, доцент, филиал Ростовского государственного университета путей сообщения, Воронеж, Россия.

Бахаев Константин Вячеславович – кандидат технических наук, доцент, Липецкий государственный технический университет, Липецк, Россия.
Email: bakhaev@stu.lipetsk.ru.

Konstantin N. Solomonov – DrSc (Eng.), Professor,
Branch of Rostov State Transport University, Voronezh, Russia.
Email: konssol@list.ru.

Lyudmila I. Tishchuk – PhD (Eng.), Associate Professor,
Branch of Rostov State Transport University, Voronezh, Russia.

Konstantin V. Bakhaev – PhD (Eng.), Associate Professor,
Lipetsk State Technical University, Lipetsk, Russia.
Email: bakhaev@stu.lipetsk.ru.