УДК: 621.735.32

ФЕНОМЕНОЛОГИЧЕСКИЕ ОСОБЕННОСТИ ОСАДКИ ЦИЛИНДРИЧЕСКОЙ ЗАГОТОВКИ КОНИЧЕСКИМИ И ПЛОСКИМИ БОЙКАМИ. СООБЩЕНИЕ 1

В.А. Тюрин¹, д.т.н., профессор

А.Л. Сапунов², технический директор, зам. генерального директора

¹ Национальный исследовательский технологический университет «МИСиС» (Москва, Россия)

² ОАО «Русполимет» (Кулебаки, Нижегородская область, Россия)

Аннотация. В работе построены схемы пластических потоков металла для основных стадий осадки цилиндрической заготовки коническими и плоскими бойками. Установлено месторасположение раздела потоков на линии, разделяющей две свободные поверхности на торце заготовки – внутреннюю (коническую) и наружную (боковую). Направления потоков вытеснения металла, кривизна траекторий, переход участков свободной от контакта с инструментом поверхности заготовки на торцевую, знакопеременный поворот главных осей ячеек координатной сетки, деформационные повороты и сдвиги в приторцевой области составляют феноменологические особенности осадки заготовки коническими и плоскими бойками. Деформационный эффект применения конических и плоских бойков при осадке оказался лучше, чем от уменьшения контактного трения и преобразования тормозящих сил трения в активные. Теоретические выводы основаны на результатах анализа одной и той же координатной сетки внутри заготовки по девяти фотографиям при поэтапной осадке.

Ключевые слова: осадка, конические и плоские бойки, потоки и схемы потоков пластического течения, деформации, сдвиг, перемещение, поворот.

E-MAIL: prof.tiurin@mail.ru

В технологическом цикле производства колец из жаропрочных сталей и сплавов вакуумно-дугового переплава (ВДП) предусмотрена предварительная ковка слитков – биллетирование, осадка и протяжка. Коэффициент укова после этих трех кузнечных операций составляет 7,0. В дальнейшем прокованные заготовки осаживают плоскими бойками, прошивают и раскатывают на специализированных машинах. При этом коэффициент укова может составлять $14,0 \div 15,0$, а суммарный коэффициент укова достигает $98,0 \div 105,0$. Тем не менее, техническими условиями на поставку колец для аэрокосмической индустрии необходимость предварительнойковки слитков предусмотрена как обязательная. Такая большая величина укова объяснялась тем, что для некоторых сочетаний конкретных технологических факторов отказ от предварительнойковки слитков приводил к отрицательным последствиям. В частности, при ультразвуковом контроле в некоторых областях колец параметры импульсов на экране катодной трубки превышали допустимые величины, а при разрушении колец и металлографических исследованиях оказывалось, что причиной являются остатки дендритной структуры металла ВДП и большой размер зерен. Последнее получается вследствие недостаточной деформационной проработки транскристаллитной дендритной структуры слитка ВДП, а также неравномерности деформации, при которой в кольце могут быть зоны с критическими значениями местных деформаций, в которых получается аномально крупное зерно, дающее недопустимо большие импульсы отраженного сигнала при ультразвуковом контроле.

Было предложено отказаться от предварительнойковки слитков ВДП, а критические значения местных деформаций повысить путем принудительного деформирования металла в зонах затрудненной деформации [1].

Применение конических бойков для уменьшения неравномерности деформации при осадке описано в трудах С.И. Губкина, И.М. Павлова и В.И. Залесского. В данной работе оптимальная величина угла при вершине конического бойка была определена методом математического планирования эксперимента [2], а конфигурация и распространение зон деформаций моделированием методом конечных элементов [3].

Моделирование методом конечных элементов считается самым современным для идеальной сплошной среды, однако по информативности о кинематических условиях в очаге деформаций он уступает методу координатных сеток, о физических процессах структурных изменений в реальных металлах с кристаллитной структурой – методу анализа межзеренных перемещений. Метод графоаналитического построения и анализа полей деформаций, изолиний дает возможность оценить градиент деформаций по густоте линий с одинаковым уровнем местных деформаций. Направление макропотоков внутри заготовки и положение «нейтральных» линий наилучшим образом позволяет определить метод деформирования заготовок, составленных из разноцветных слоев пластилина.

Дальнейшее сравнение возможностей пяти перечисленных методик исследования деформированного состояния металла [4] показало, что для достижения целей, поставленных в работе, предпочтительнее применить метод координатных сеток, в частности выпол-

нить физическое моделирование в реальных граничных условиях трения.

Метод координатных сеток, примененный при по-
стадийной осадке, дает возможность быстро и с доста-
точно высокой достоверностью построить траектории
перемещения «узлов» и получить сведения о наличии
и расположении поверхностей стыка и раздела потоков
пластического течения, а также о нейтральных поверх-
ностях.

Исследования выполняли на свинцовых заготовках
высотой 60 мм и диаметром 40 мм, составленных из
двух полуцилиндров. На плоской поверхности одного
из них были нанесены координатные сетки трех типов:
соприкасающиеся окружности диаметром 5 мм, систе-
мы ортогональных прямых линий с шагом 5 и 2,5 мм
(рис. 1, *а*). Глубину линий координатных сеток выбира-
ли такой, чтобы элементы сеток сохранились при осад-
ке заготовки на 80 ÷ 85 %. Полуцилиндры соединяли

Рис. 1. Фотографии координатных сеток в диаметральной плоскости разреза цилиндрической заготовки (*а*) и при постадийной осадке коническими бойками на 10 % (*б*), 20 % (*в*), 30 % (*г*), 40 % (*д*), 50 % (*е*), 60 % (*ж*) и плоскими бойками (*з*), (*и*)

с помощью сплава Вуда, после чего цилиндрическую заготовку осаживали коническими бойками с углом при вершине 120° за шесть стадий с шагом 10 %, а затем плоскими бойками еще за две стадии до суммарной степени 75 %.

Величина угла 120° при вершине конуса бойка была выбрана на основании результатов предыдущего исследования [2] при поиске оптимальных условий при обжатии цилиндрической заготовки комбинированным инструментом. Оптимальная величина угла находится в диапазоне $90 \div 120^\circ$ при коэффициенте контактного трения, равном 0,3, и при условии изотермической осадки и квазистатического нагружения. При осадке свинцовых заготовок стальным шероховатым инструментом эти условия соблюдаются.

После каждой стадии осадки заготовку разъединяли на две части, проводили специальную обработку линий сетки – визуализацию, фотографировали координатные сетки, вновь соединяли две части и осуществляли следующую стадию осадки. Обработку деформированных координатных сеток выполняли по фотографиям, увеличенным в 3 раза. Измерение элементов сеток с точностью до половины толщины линии обеспечило погрешность в расчетах компонент местных деформаций не более 10 % для ячеек со стороной 2,5 мм и не более 5 % для ячеек со стороной 5 мм и окружностей диаметром 5 мм.

Визуальный анализ девяти последовательных фотографий координатных сеток (см. рис. 1) показал, что двойная «бочка» на боковой поверхности заготовки стала заметной после осадки на 30 %. Горизонтальные

линии в приторцевой зоне у части торца, свободной от контакта с коническим бойком, повернулись, произошла «утяжка», которая закончилась при осадке на 60 %, когда вся торцевая поверхность стала контактной с коническим бойком. В этот момент обжатие заготовки коническими бойками прекратили и осадку заготовки продолжили плоскими бойками.

Плоский боек обжимает периферический «венчик» – кольцевой участок (рис. 2). Произошла смена знака и характера потока в периферийной приторцевой кольцевой области заготовки. В вертикальном направлении поток вытеснения $Q'_в$ разделился на два потока $Q'_в$ и $Q''_в$. Основной поток вытеснения Q сохраняет радиальное направление. Силы трения T остаются тормозящими, направлены к оси заготовки, но действуют по расчлененной контактной поверхности: при осадке коническими бойками – в центральной части торца заготовки, при осадке плоскими бойками – в периферийной кольцевой части торца. На торце заготовки образуются взаимно чередующиеся участки, свободные от контакта с инструментом: сначала на периферии торца, потом в его центральной части. Точка P – точка на границе контактной и свободной части торца перемещается сначала от оси заготовки ($P_к$) при осадке коническими бойками, а при смене бойков скачком занимает другое положение – на периферийном «венчике» торца ($P'_н$) и меняет знак перемещения – к оси заготовки ($P''_н$) при осадке плоскими бойками.

Для построения траекторий перемещения материальных точек в заготовке при осадке коническими и плоскими бойками выбрали 24 перекрестия орто-

Рис. 2. Направления вытеснения металла (Q , Q' , Q'') при осадке заготовки коническими (а) и плоскими (б) бойками: T – силы трения; $P_к$, $P'_н$, $P''_н$ – направления перемещения точки на границах контактной и свободной поверхностей; V – направление предписанного потока

гональных линий с шагом 5 мм. Последовательная суперпозиция девяти фотографий деформированной координатной сетки позволила получить 24 траектории в координатах $1/2H$ – высота заготовки по ее оси и R – радиус заготовки в ее экваториальном сечении (рис. 3).

На рис. 3 есть траектории точек, которые до седьмого этапа осадки перемещались с замедлением в радиальном направлении и увеличением компоненты перемещения в высотном, так как на контактной поверхности действовали тормозящие силы трения. В то же время, в приконтактных областях с коническими бойками радиальные перемещения больше, чем при осадке плоскими бойками при равномерной деформации. На фотографиях это видно по местному изгибу вертикальных линий сеток, а на траектории – по «перегибу» кривизны, что показывает глубину проникающего воздействия конического бойка. При последующих двух стадиях осадки заготовки плоскими бойками траектории точек возвращаются к «нормальной» кривизне, соответствующей характеру траекторий при обычной осадке плоскими бойками. Длительность существования «перегиба» на траектории узла координатной сетки дает возможность установить продолжительность деформационного воздействия конического бойка в определенной области объема заготовки при осадке.

Девять фотографий координатных сеток при постадийной осадке достаточно хорошо показывают образование, распространение, изменение и преобразование зон деформации. Для количественной оценки этих процессов были рассчитаны главные относительные местные деформации увеличения и уменьшения размеров окружностей координатной сетки, такие же две компоненты главных логарифмических деформаций, а также углы поворота главных осей эллипсов, характеризующих местные деформации сдвига.

Из-за громоздкости рисунков (пять полей изолиний, построенных для каждой из восьми стадий осадки, всего 40 полей изолиний) они не приведены в данной работе, даны только результаты их анализа и некоторые схемы, иллюстрирующие некоторые особенности формирования и изменения деформационной картины – деформированного состояния координатных сеток в заготовке при осадке (рис. 4).

При движении по контактной поверхности заготовки, обжатой коническим бойком по рис. 1, $\mathcal{K}$ от оси к боковой поверхности, главные вертикальные оси квадратных ячеек со стороной 5 мм поворачиваются сначала против часовой стрелки, а вблизи боковой поверхности – по часовой стрелке (рис. 4, *а*, первая строка ячеек), т.е. наблюдается смена знака деформаций сдвига. В ячейках сетки, расположенных на некоторой глубине от контактной поверхности, смена знака происходит в ячейках, удаленных от боковой поверхности ближе к оси заготовки (рис. 4, *а*, четвертая строка ячеек). На $1/4$ части плоскости заготовки область смены знака деформаций сдвига перемещается от места перехода боковой поверхности («бочки») на торец заготовки к оси, по диагоналям ячеек, в центральную зону равномерных деформаций (см. рис. 1, $\mathcal{K}$).

Некоторые точки перемещаются «вверх», т.е. вытесняются по поверхности конуса как при измерении твердости по поверхности индентера. Это точки: 1.3, 1.4, 2.3, 3.3.

При обжатии плоскими бойками (см. рис. 1, $\mathcal{Z}$) появляются развитые, большие по площади, зоны равномерной деформации, в них линии координатных сеток становятся горизонтальными, оси эллипсов, находившихся под коническим бойком и повернутые примерно на 45° , заняли горизонтальное положение (рис. 4, *б*), повернувшись на примерно на 45° в противоположном направлении, т.е. произошел знакопеременный поворот при практически неизменной длине

Рис. 3. Траектории перемещения узлов (перекрестий) координатной сетки с квадратными ячейками 5 мм (по рис. 1, *а*) при осадке: H – высота заготовки, R – ее радиус. Показаны для $1/4$ части плоскости разреза заготовки: (*а*) – при осадке коническими и плоскими, (*б*) – при осадке только плоскими бойками

Рис. 4. Фрагменты явлений на стадиях осадки заготовки коническими и плоскими бойками:

а – поворот (показан стрелками) главных осей (показаны жирными линиями) квадратных ячеек 5 мм после осадки коническими бойками (по рис. 1, ж); *б* – поворот (показан стрелками) главных осей круглых ячеек диаметром 5 мм после первой стадии осадки плоскими бойками (по рис. 1, з); *в* – распространение поворота главных осей эллипсов (показано стрелками) от приторцевой области вглубь заготовки при обжатии «венчика»; *г* – сдвиги в «угловой» области торце-боковая поверхность – фотография макроструктуры и схема; *д* – повороты квадратных ячеек со стороной 2,5 мм в «угловой» области торце-боковая поверхность – фотография координатной сетки и схема

оси эллипса сетки. Те области, которые находились под контактной поверхностью с коническим бойком, теперь продеформированы путем сдвига при выпрямлении конической полости, а не от прямого воздействия плоского бойка. Чередование направлений поворота осей эллипсов координатной сетки показало наличие деформаций сдвига в приторцевых областях и распространилось вглубь заготовки (рис. 4, в).

После второй стадии осадки плоскими бойками сдвиги в «углах» заготовки по границам зон затрудненной деформации (рис. 4, г) заменены поворотом, т.е. также деформацией сдвига в широкой полоске у периферийной части торца. Особенно хорошо поворот заметен на сетке со сторонами ячеек 2,5 мм (см. рис. 1, и), который составил более 60°, т.е. явление перехода боковой поверхности на контактную (переход «бочки на торец») не просто жесткое «перекачивание», а действие сдвиговых деформаций.

После второй стадии осадки заготовки плоскими бойками зона затрудненной деформации образовалась под вершиной конического «венчика», где непродетформированный коническим бойком металл оказался сразу в зоне затрудненной деформации, образовавшейся под плоским бойком, т.е. на периферийной части торца заготовки, а не около его центра. На краю торца заготовки образовалась зона больших нормальных деформаций и больших поворотов главных осей эллипсов ячеек сетки.

Конический боек сформировал область больших нормальных деформаций и в высотном и в поперечном направлениях. После осадки плоскими бойками деформационное влияние сохранилось в зоне до 1/2 радиуса торца. Область максимальных деформаций образовалась под вершиной конического бойка на глубине второй и третьей строк ячеек сетки, т.е. на глубине примерно 1/4 высоты заготовки.

Линии координатной сетки в средней области заготовки стали горизонтальными, за исключением участков, которые переходили с боковой поверхности на контактную – как на конический боек, так потом и на плоский. Итоговое распределение деформаций получилось близким к равномерному, а история формирования деформированного состояния заготовки характеризуется знакопеременными поворотами главных осей эллипсов сетки, т.е. сдвигами в довольно обширной области, занимающей около половины меридионального сечения заготовки. Полученный эффект не получали ни применением высокоэффективных смазок, ни применением пластичных прокладок на торцах заготовки.

Осадку коническими, а затем плоскими бойками интересна тем, что поверхность контакта заготовки с инструментом не остается сплошной, монолитной. При деформации коническим бойком поверхность контакта увеличивается от оси в радиальном направлении, образуя коническое углубление – «чашку» с периферий-

ным «венчиком». При последующей осадке плоскими бойками боек контактирует с вершиной «венчика», наибольшие местные деформации получаются не над «венчиком». Под образовавшейся плоской кольцевой площадкой располагается зона затрудненной деформации (см. рис. 1, з).

Схема потоков пластического течения металла при обжатии «венчика» представлена одним потоком вытеснения в радиальном направлении (см. рис. 2) и двумя потоками вытеснения по вертикальной оси с разделом двух потоков в одном направлении. Раздел потоков представлен по разделу свободной поверхности на конической полости и свободной поверхности на «бочке». Этот раздел перемещается в радиальном направлении вместе с основным потоком вытеснения в условиях действия тормозящих сил трения. Таким образом, обжатие «венчика» характеризуется переходом разделенных и неравноценных по кинематическим условиям участков свободной поверхности на контактную. Перемещения на торце заготовки уменьшаются из-за перехода свободной конической поверхности углубления на контактную. Зона затрудненной деформации занимает всю первую строку ячеек, а ее периферийная кольцевая часть образуется за счет перехода «бочки» на контактную поверхность в конце второй стадии обжатия плоскими бойками.

Изучение местных деформаций при обжатии «венчика» вплоть до полного выпрямления конической полости показывает его большее влияние на итоговое распределение деформаций в прибоковой области, чем конический боек и осадка плоскими бойками на первой стадии.

Выводы. Деформационный эффект применения комбинированного инструмента – конических и плоских бойков при осадке лучше, чем от уменьшения коэффициента контактного трения путем применения высокоэффективных смазок или от изменения характера

тормозящих сил трения на активные путем установки пластичных прокладок на торцы заготовки.

Схема потоков пластического течения при обжатии «венчика» на торце заготовки представлена одним основным потоком вытеснения в радиальном направлении и двумя потоками вытеснения по вертикальной оси с разделом этих двух потоков в одном направлении.

Расчленение торцевой поверхности заготовки на контактные и свободные от контакта с инструментом участки с последующей сменой их местоположения оказывается эффективнее уменьшения коэффициента трения для снижения неравномерности деформации.

Переход боковой поверхности заготовки на торцевую происходит не только вследствие жестких перемещений, а за счет деформаций сдвига путем поворота главных осей ячеек координатной сетки на угол до 60°.

Область смены знака деформаций сдвига перемещается от перехода боковой поверхности на торцевую по диагоналям квадратных ячеек координатной сетки к оси заготовки в центральную зону равномерных деформаций; в этой зоне происходит знакопеременный поворот осей эллипсов – сдвиг при практически неизменной их длине, т.е. при неизменных относительных деформациях.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Пат. 2465979 РФ. Способ производства кольцевых изделий. / В.А. Тюрин, Д.В. Батяев, Ю.В. Луканин, А.Л. Сапунов. 2012. Бюлл. № 31.
2. Тюрин В.А., Батяев Д.В. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2013. № 3. С. 8 – 10.
3. Тюрин В.А., Батяев Д.В. // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. 2012. № 10. С. 40 – 44.
4. Савонькин М.Б., Тюрин В.А. // Изв. вуз. Черная металлургия. 2013. № 5. С. 24 – 27.

© 2014 г. В.А. Тюрин, А.Л. Сапунов
Поступила 13 декабря 2013 г.

PHENOMENOLOGICAL FEATURES OF RAINFALL TAPERED CYLINDRICAL WORKPIECE AND FLAT DIES. REPORT 1

V.A. Tyurin¹, Dr.Eng., Professor

A.L. Sapunov², Technical Director, Deputy General Director

¹ National University of Science and Technology "MISIS" (Moscow, Russia)

² JSC "Ruspolimet" (Kulebaki, Nizhny Novgorod region, Russia)

E-MAIL: prof.tiurin@mail.ru

Abstract. The work describes the schemes how plastic metal flows for the main stages of precipitation cylindrical workpiece flat and conical strikers. The location of flows on the line separating two free surfaces of the workpiece at the end – the inner, conical and outer, side part – was set. Flow direction of displacement of the metal, the curvature of trajectories, the transition areas free from contact with the tool and workpiece surface on the end, alternating the rotation of the principal

axes of the grid cells, deformation turns and shifts in the region at the end zone are phenomenological features of rainfall harvesting conical and flat dies.

Keywords: upsetting, conical and flat dies, flows and schemes of plastic metal flows, strain, shear, displacement, rotation.

REFERENCES

1. Tyurin V.A., et al. *Sposob proizvodstva kol'cevykh izdelij* (The method of producing of annular products). Patent RF №2465979, B21K 1/28, B21J 1/06, 2012
2. Tyurin V.A., Batjaev D.V. *Izvestija VUZov. Chernaja metallurgija*. 2013. № 3. pp. 8 – 10.
3. Tyurin V.A., Batjaev D.V. *Kuznechno-shtampovochnoe proizvodstvo. Obrabotka materialov davleniem*. 2012. № 10. pp. 40 – 44.
4. Savon'kin M.B., Tyurin V.A. *Izvestija VUZov. Chernaja metallurgija*. 2013. № 5. pp. 24 – 27.

Received 13 December 2013