

Анализ напряженно-деформированного состояния в очаге деформации при сверхпластической формовке круглой мембраны. Часть I. Проблемы моделирования процесса сверхпластической формовки

Самойлова А.Ю.^{1†}, Загиров Т.М.¹, Еникеев Ф.У.¹, Круглов А.А.^{2‡}

[†]Alina20081963@yandex.ru, [‡]alweld@go.ru

¹ Уфимский государственный нефтяной технический университет, ул. Космонавтов, 1, 450062 г. Уфа

² Институт проблем сверхпластичности металлов РАН, ул. Ст.Халтурина, 39, 450001 г. Уфа

Stress analysis of the superplastic forming of circular membrane. Part I. Problems of superplastic forming modeling

A.Yu. Samoilova¹, V.R. Ganieva¹, F.U. Enikeev¹, A.A. Kruglov²

¹ Ufa State Petroleum Technological University, Kosmonavtov St. 1, 450062 Ufa

² Institute for Metals Superplasticity Problems RAS, Khalturin St. 39, 450001 Ufa

Обсуждаются проблемы, возникающие при моделировании технологических процессов обработки давлением ультрамелкозернистых материалов в температурно-скоростных условиях проявления эффекта сверхпластичности. В качестве примера рассмотрена технологическая схема сверхпластической формовки листового проката в матрицу цилиндрической формы.

Ключевые слова: моделирование; сверхпластическая формовка; напряженно-деформированное состояние; реология

Обработка металлов давлением (ОМД) в состоянии сверхпластичности (СП) представляет собой сравнительно новый метод получения деталей ответственного назначения из конструкционных сплавов на основе железа, алюминия, магния, титана, никеля, а также других конструкционных материалов, таких как интерметаллиды, керамики и композиционные материалы [1, 2]. Принято считать, что он появился после опубликования пионерской работы В. Бэкофена с колл. из Массачусетского технологического института (MIT) [3], в которой сообщалось о том, что из листового сплава цинка с алюминием толщиной 0,76 мм через матрицу с отверстием диаметром 100 мм при давлении 0,1-0,2 МПа были отформованы купола высотой больше диаметра матрицы. После этого стал очевиден промышленный потенциал явления СП, что привело к информационному взрыву: за последующие десятилетия в литературе появились тысячи, если не десятки тысяч публикаций, посвященных исследованию основных закономерностей этого удивительного явления и способам его практического использования.

Problems of modeling of technological processes of pressure forming for the case of ultrafine-grained materials in the temperature-strain rate conditions of superplasticity are discussed. The process of superplastic forming of sheet metal in a matrix of cylindrical shape is considered as an example.

Keywords: modeling; superplastic forming; stress analysis; rheology

Авторы обзора [4], опубликованного в 1970 году, отметили, что использование СП на практике представляется привлекательным по двум причинам. Во-первых, легко могут быть достигнуты значительные пластические деформации без ее локализации, и во-вторых, величина напряжений течения при этом, как известно, очень низкая по сравнению с тем уровнем, который имеет место при обычной (несверхпластической) деформации в аналогичных температурно-скоростных условиях деформирования. В то же время, основным недостатком является то обстоятельство, что скорости деформации при СП сравнительно невысоки по сравнению с традиционными процессами ОМД.

Как отмечают Падманабхан и Дэви [5], на ранних стадиях внедрения СП в промышленные технологии инженеры-практики принимали во внимание прежде всего определенное сходство между поведением сверхпластичных материалов и термопластиков, откуда следовало, что известные технологии для термопластиков могут быть легко перенесены на сверхпластичные материалы. Так, например, Филдс [6] первым осуществил формовку в вакууме эвтектоида Zn-22%Al и наглядно

продемонстрировал, что при обеспечении глубокой вытяжки сверхпластичный материал способен воспроизводить даже мельчайшие детали гравюры штампа. В 1971 году Филдс и Стюарт опубликовали работу [7], в которой привели фотографии деталей сложной формы, отформованных из эвтектоида Zn-22%Al в состоянии СП. Корнфилд и Джонсон [8] получили полые детали сложной формы не только из модельного сплава Zn-22%Al, но и из промышленного титанового сплава IMI 318 (Ti-6Al-4V) и нержавеющей стали марки IN 744 (Fe-26Cr-6.5Ni).

Из работ Бэкофена с колл. [3] и Филдса [6, 7] стало очевидным определенное сходство между процессами формообразования сверхпластичных и полимерных материалов, поэтому ряд исследователей, например, Джонсон [9] подчеркнули возможность использования известных методик формовки полимеров, таких как вакуумная формовка, декоративная газостатическая формовка, свободная выдувка и т.п. для формовки сверхпластичных материалов.

Падманабхан [10], со ссылкой на обзор Лунца [11], отметил, что промышленность не нуждается в усложнении существующих технологий ради собственно самого усложнения. Отсюда следует, что жизненно важным становится вопрос о том, принесет ли внедрение СП в технологии ОМД реальную экономическую выгоду или улучшение качества и/или повышение уровня механических свойств производимых деталей. Более того, при разработке новых технологий необходимо постоянно помнить о том, что в каждый данный момент времени новые разработки занимают только очень узкую периферийную нишу среди известных технологий ОМД. Поэтому при проведении технологических исследований и разработке опытных технологий необходимо постоянно помнить о том, что они должны либо улучшать уже известные и опробованные на практике технологии, например, повышать коэффициент использования металла, либо сузить возможности получения деталей с новым уровнем свойств и/или заметно снижать затраты на их производство. Ханди [12] рассмотрел более широкий спектр возможных применений СП, в частности, в области двигателестроения. Он отметил, что применение сверхпластической деформации экономически оправдано в тех случаях, когда это дает возможность замены сложных сварных конструкций одной деталью, отформованной в состоянии СП.

Применение СП в традиционных технологиях ОМД, таких как прокатка и объемная штамповка, также представлялось перспективным направлением в развитии технологии в силу относительно невысоких значений напряжений течения в состоянии СП, что снижало требования к прочности инструмента и штамповой оснастки [1, 5]. Особенностью ОМД в состоянии СП являлось требование обеспечения довольно узкого интервала сравнительно низких скоростей деформаций при изотермических условиях деформирования. Это удорожало процесс и снижало его эффективность в смысле производительности. Тем не менее, в некоторых случаях, например, при изготовлении деталей ответственного назначения для аэрокосмической промышленности, применение СП оказалось эффективным и выгодным. С другой стороны, Хэйдэн с колл. [13], которые иссле-

довали особенности структурных изменений в сплавах системы Ni-Fe-Cr при их прокатке в условиях СП, по-видимому, первыми обратили внимание на то обстоятельство, что обработка металлов в режиме СП может привести не только к получению желаемой формы, но еще и к повышению уровня механических свойств в готовом изделии.

ОМД в условиях СП позволяет повысить предел текучести σ_T и удлинение до разрыва δ , уменьшить анизотропию механических свойств и в 1,2–1,25 раза повысить усталостную прочность [14].

Среди известных способов ОМД в состоянии СП особое место по праву принадлежит процессам сверхпластической формовки (СПФ) и СПФ совмещенной со сваркой давлением (СД), поскольку именно в процессах СПФ и СПФ/СД явление СП нашло наиболее яркое воплощение [15, 16].

По сравнению с традиционными процессами обработки СПФ имеет следующие преимущества: возможность получения деталей сложной формы за одну формообразующую операцию, в отличие от традиционных технологий производства тех же деталей многопереходной штамповкой или другими способами; относительно низкая стоимость оснастки, так как обычно требуется только один инструмент, вместо точно сопряженных пуансона и матрицы или многопозиционных штампов; высокий коэффициент использования материалов, низкие капитальные затраты на производственное оборудование, так как деформирующие усилия относительно малы.

Эффективность СПФ убедительно проявляется при изготовлении одной детали вместо сборного узла, состоящего из нескольких частей, путем одновременной формовки таких элементов, как ребра жесткости, выпуклости, впадины и т.д. Например, воздухозаборник вертолета фирмы «Westland», состоящий из 35 деталей был получен за счет СПФ из 11 [2].

Процессы СПФ и СПФ/СД находят широкое применение при обработке листовых промышленных сплавов на основе алюминия и титана, и особенно – промышленного листового титанового сплава ВТ6 (Ti-6Al-4V), который, по образному выражению Бойера [17] (Boeing, USA), является «рабочей лошадкой» всей индустрии титана, поскольку занимает 60% объема производства всех титановых сплавов.

Среди деталей, получаемых по технологии СПФ из титанового сплава Ti-6Al-4V, можно выделить фитинги, крупногабаритные днища, панели, перегородки, воздуховоды, шпангоуты для бомбардировщика В-1 [2], причем старый образец шпангоута имел 104 детали, новый же изготовлен из одного листа, весит на 30% меньше и дешевле на 50%. Другим примером может служить истребитель F-15, в котором 15 деталей ответственного назначения изготовлены с использованием СП. Так, в частности, для изготовления одной из деталей применение метода СПФ позволило уменьшить вес исходной заготовки с 6,2 кг до 0,4 кг, а вес изделия – с 0,27 кг до 0,21 кг, понизив при этом на 65% стоимость металла. В литературе появились сведения об использовании СПФ при производстве вакуумных камер для ядерных исследований, дверей для самолета Concorde размерами 400x350

мм, топливных баков диаметром 380 мм, сложных тонкостенных подпорок, деталей для катапультирующего сиденья, сосудов давления для космических спутников и др. [19-24].

Изделия, изготавливаемые методом СПФ/СД, находят применение в таких отраслях машиностроения как авиакосмическая, судостроение, транспорт, строительство и т.д. Это силовые конструкции – крыльевые и корпусные узлы, перегородки, стойки, стенки, панели, ребра, балки, сложные оболочки, вращающиеся части двигателя [25]. Результатом реализации преимуществ данной технологии является снижение веса получаемых конструкций до 50% и затрат на изготовление до 60%.

СПФ листового проката в матрицу цилиндрической формы представляет собой одну из традиционных технологических схем, широко используемую в практике обработки давлением промышленных листовых титановых сплавов. Например, именно по этой схеме специалисты Национального университета Тайваня получают из сплава Ti-6Al-4V переносные сосуды высокого давления для хранения охладителя инфракрасных датчиков, выдерживающие внутреннее давление до 61 МПа при толщине стенки 1 мм [26]. Кроме того, освоена технология изготовления из того же сплава и по той же технологической схеме сферических сосудов высокого давления для крылатых ракет среднего радиуса действия, а также коррозионно-стойких поплавков контакторов уровня жидкости для химической промышленности. Поскольку изделия аналогичного назначения производятся не только на Тайване, имеется множество публикаций, посвященных анализу напряженно-деформированного состояния и расчету основных технологических параметров процесса СПФ листового проката в матрицу цилиндрической формы, см, например, [27-37]. Каждый год появляются все новые и новые публикации, в работу вовлечены исследователи США, Японии, России, Индии, Китая, Кореи, Тайваня, Сингапура и других стран. Это обстоятельство свидетельствует, с одной стороны, об актуальности анализа рассматриваемой технологической схемы, а с другой – о сложности проблемы (несмотря на всю ее кажущуюся простоту).

Основные причины сложившейся ситуации следует искать, по-видимому, не столько в очевидной сложности описания реологического поведения микрокристаллических материалов в состоянии СП (хотя этого никто и не отрицает), сколько в сложившемся характере проведения исследований в области СП. На это обстоятельство обращают внимание авторы работ [34, 35]. По их мнению, исторически сложилось так, что явление сверхпластичности отметили (т.е. выделили как специфическое свойство материала) и систематически начали исследовать материаловеды и физики; они же первыми предприняли попытки использовать это явление в технологических процессах обработки металлов давлением. Это обстоятельство способствовало, с одной стороны, созданию у материаловедов ощущения, что они “все знают и могут” в сверхпластичности, с другой – развитию однобокости в теоретическом изучении и излишнего эмпиризма в практическом применении явления сверхпластичности. Стал заметным, в частности, явно низкий уровень в создании математических моделей материалов

и технологических процессов, в использовании методов и результатов механики деформируемого твердого тела.

Внимание исследователей СП в течение последних десятилетий было сконцентрировано на выявлении механизмов сверхпластической деформации, а основные усилия были направлены в сторону достижения более глубокого понимания этих механизмов. При этом практические применения СП в технологиях ОМД развивались, главным образом, путем накопления эмпирического опыта, т.е. методом проб и ошибок; специалисты в области механики и инженеры-вычислители не привлекались к работе на этапе опытно-конструкторских разработок. В лучшем случае механикам оставляли роль аккомпаниаторов немого кино, когда было необходимо украсить готовые технологии подходящими компьютерными “картинками”, призванными “научно обосновать” уже найденные эмпирическим путем технологические решения [36]. Из этого обстоятельства естественным образом вытекал и крайне низкий уровень требований к точности моделирования; во многих случаях устраивало чисто внешнее сходство получаемых в результате проведения расчетов красивых картинок распределений параметров напряженно-деформированного состояния с интуитивными представлениями разработчиков новых технологий о том, что должно происходить, по их мнению, в очаге деформации. Специалистов в области физики и материаловедения СП гораздо больше интересует, например, вклад зернограничного проскальзывания в общую деформацию, нежели значения таких “приземленных” параметров, как величина приложенного давления, продолжительность формовки, геометрия заготовки и т.п.

Высказанные выше критические замечания связаны с тревогой, которую вызывает складывающаяся сегодня ситуация с развитием и внедрением в производство наукоемких ресурсосберегающих и малоотходных технологий обработки давлением наноструктурных материалов. Как известно, см., например, [38-41], наноструктурными принято считать материалы, размер структурных составляющих в которых хотя бы в одном измерении не превышает 100 нм. Эти материалы имеют уникальные физико-механические свойства, значительно отличающиеся от свойств обычных, крупнозернистых материалов. Технологии получения наноструктурных материалов и дальнейшая работа с ними относится к нанотехнологиям [42]. Ситуация, складывающаяся сейчас с развитием технологий обработки давлением объемных наноструктурных материалов, напоминает ситуацию, сложившуюся в научном мире после опубликования классической работы В. Бэкофена с колл. [3]. Анализ цитированных выше публикаций позволяет предположить, что развитие исследований в области нанотехнологий может пойти по тому же самому пути, по которому пошли после 1964 г. при внедрении результатов фундаментальных исследований действующих механизмов СП деформации. Исследователи направляли свои усилия на более глубокое понимание этих механизмов в ущерб развитию методов математического моделирования технологических процессов ОМД тогда микрокристаллических, а ныне наноструктурных материалов. В то же время, с точки зрения механики деформируемого твердого тела, особых разли-

чий в реологическом поведении между наноструктурными и микрокристаллическими материалами пока не обнаружено, за исключением разве что численных значений некоторых реологических параметров, входящих в используемые в расчетах модели материалов. Следует подчеркнуть, что речь идет именно о реологических, а не механических свойствах наноструктурных материалов, исследованию которых посвящен ряд работ [41, 43]. В этой связи уместно напомнить, что в результате развития исследований СП было установлено, что обработка материалов в режиме СП позволяет не только получать сложнопрофильные изделия с минимальным припуском на дальнейшую механическую обработку, но еще и обеспечивать в них высокий комплекс функциональных свойств [43].

Литература

1. O.M. Smirnov Superplastic metal working techniques. Moscow: Mashinostroenie (1979) 184 p. (in Russian) [Смирнов О.М. Обработка металлов давлением в состоянии сверхпластичности. М.: Машиностроение, 1979. 184 с.].
2. Superplastic Forming of Structural Alloys, ed. by N.E. Paton, C.H. Hamilton, San Diego, California, TMS-AIME (1982) 312 p.
3. W.A. Backofen, I.R. Turner, D.H. Avery. Trans. ASM. **57**, 980 (1964).
4. G.L. Davies, J.W. Edington, C.P. Cutler, K.A. Padmanabhan. J. Mat. Sci. **5**, 1091 (1970).
5. K.A. Padmanabhan, J.J. Davies. Superplasticity. Berlin, Germany, Springer Verlag (1980) 314 p.
6. D.S. Fields. J. Res. Dev. **9**, 134 (1965).
7. D.S. Fields, T.J. Stewart. Int. J. Mech. Sci. **13**, 63 (1971).
8. G.G. Cornfield, R.H. Johnson. Int. J. of Mech. Sci. **12** (6) 479 (1970).
9. R.H. Johnson. Design Engineering. **3**, 33 (1969).
10. K.A. Padmanabhan. Trans. of Indian Inst. Metals. **6**, 41 (1973).
11. J.A. Luntz. Plasticity and Superplasticity, London, Institute of Metallurgists. Review Course. Ser. **2** (3), (1969).
12. B.B. Hundy. Plasticity and Superplasticity, London, Institute of Metallurgists. Review Course. Ser. **2** (3), (1969).
13. H. W. Hayden, R.C. Gibson, H. F. Merrick, J.H. Brophy. ASM Trans. Quart. **60**, 3 (1967).
14. V.A. Masterov, V.S. Berkovskii. Theory of plastic deformation and metal working techniques, Moscow, Metallurgy (1989) 400 p. (in Russian) [Мастеров В.А., Берковский В.С. Теория пластической деформации и обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1989. 400 с.].
15. A.A. Kruglov, O.A. Rudenko. Letters on Materials. **2** (2), 107 (2012). (in Russian) [Круглов А.А., Руденко О.А. Письма о материалах. 2(2), 107 (2012)].
16. R.V. Safiullin. Letters on Materials. **2** (1), 32 (2012). (in Russian).
17. R.R. Boyer. Mater. Sci. Eng. A **213**, 103 (1996).
18. J. Edington. Metals Technology. **3**(3), 138 (1976).
19. M. Atkey. Mach. Prod. Eng. **132**, 35 (1978).
20. J. Bercowitch. Engineering. **214** (3), 187 (1974).
21. R.V. Safiullin, O.A. Rudenko, F.U. Enikeev, R.Ya. Lutfullin. Superplastic Materials Science Forum. **243-245**, 769 (1997).
22. A.A. Kruglov, F.U. Enikeev, R.Ya. Lutfullin. Mater. Sci. Eng. A **323** (1-2), 416 (2002).
23. R.Ya. Lutfullin, A.A. Kruglov, R.V. Safiullin, M.K. Mukhametrahimov, O.A. Rudenko. Mater. Sci. Eng. A **503**, 52 (2009).
24. R.Ya. Lutfullin. Letters on Materials. **1** (2), 88 (2011). (in Russian) [Лутфуллин Р.Я. Письма о материалах. **1** (2), 88 (2011)].
25. R.V. Safiullin. Letters on Materials. **2** (2), 36 (2012). (in Russian) [Сафиуллин Р.В. Письма о материалах. **2** (2), 36 (2012)].
26. J. C. Huang, T.H. Chuang. Materials Chemistry and Physics. **57**, 195 (1999).
27. F. Jovane. Int. J. of Mech. Sci. **10** (5), 403 (1968).
28. D.L. Holt. Int. J. of Mech. Sci. **12**, 491 (1970).
29. J.A. Belk. Int. J. Mech. Sci. **17**, 505 (1975).
30. A.K. Ghosh, C.H. Hamilton. Metall. Trans. **13 A**, 733 (1982).
31. F.U. Enikeev. Materials Science Forum. **170-172**, 681 (1994).
32. F.U. Enikeev, A.A. Kruglov. Int. J. of Mech. Sci. **37**, 473 (1995).
33. J. Bonet, A. Gil, R.D. Wood, R. Said, R.V. Curtis. Comput. Methods Appl. Mech. Engrg. **195**, 6580 (2006).
34. R.A. Vasin, F.U. Enikeev. Introduction in mechanics of superplasticity. Part I. Ufa, Gilem (1998) 280 p. (in Russian) [Васин Р.А., Еникеев Ф.У. Введение в механику сверхпластичности: В 2 ч. Ч. I. Уфа: Гилем, 1998. 280 с.].
35. K.A. Padmanabhan, R.A. Vasin, F.U. Enikeev. Superplastic Flow: Phenomenology and Mechanics, Berlin-Heidelberg, Germany, Springer-Verlag (2001) 363 p.
36. F.U. Enikeev. Izvestiya VUZ. Tsvetnaya Metallurgiya. **1**, 43 (2008) (in Russian) [Еникеев Ф.У. Изв. Вузов. Цв. металлургия, 2008. № 1. С. 43–50].
37. T.M. Zagirov, A.A. Kruglov, F.U. Enikeev. Zavodskaya Laboratoriya. **76** (9), 48 (2010). (in Russian) [Загиров Т.М., Круглов А.А., Еникеев Ф.У. Заводская лаборатория. **76** (9), 48 (2010)].
38. H. Gleiter. Prog. Mater. Sci. **33**, 223 (1989).
39. R.Z. Valiev, R.K. Islamgaliev, I.V. Alexandrov. Progress in Materials Science. **45**, 103 (2000).
40. A.A. Nazarov, R.R. Mulyukov. Nanostructured Materials. In: Handbook on Nanoscience, Engineering and Technology, ed. by W. Goddard, D. Brenner, S. Lyshevsk, G. Iafrate. CRC Press (2002).
41. R.R. Mulyukov. Rossiiskie nanotekhnologii. **2**(7-8), 38 (2007). (in Russian) [Мулюков Р.Р. Российские нанотехнологии. **2** (7-8), 38 (2007)].
42. A.A. Kruglov, R.Ya. Lutfullin. Problems of Engineering and Reliability of Machine. **1**, 69 (2009). (in Russian) [Круглов А.А., Лутфуллин Р.Я. Проблемы машиностроения и надежности машин. **1**, 69 (2009)].
43. M.C. Somani, R. Sundaresan, O.A. Kaibyshev, A.G. Ermachenko. Mater. Sci. Eng. A **243**, 134 (1998).