

$$\begin{aligned}
& + (3636640 \cdot V_k - 1181908) \cdot (20 \cdot f - 3) + \\
& + \left(\frac{636412}{15} \cdot \phi_b - 2545648 \right) + \left(\frac{1}{200} \sigma_s - 3 \right) + \\
& + (-2812131 \cdot V_k + 913942) \cdot \left(\frac{1}{200} \sigma_s - 3 \right) + \\
& + \left(\frac{-164041}{5} \cdot \phi_b + 1968492 \right) \cdot (20 \cdot f - 3) + \\
& + \left(\frac{327034}{25} \cdot \phi_k - 1308136 \right) \cdot (20 \cdot f - 3) + \\
& + \left(\frac{163517}{50} \cdot R_k - 981102 \right) \cdot \left(\frac{1}{200} \sigma_s - 3 \right) + \\
& + \left(\frac{736954}{25} \cdot R_k - 8843448 \right) \cdot (20 \cdot f - 3) + \\
& + \left(\frac{2947816}{25} \cdot \phi_k - 11791264 \right) \cdot \left(\frac{1}{200} \sigma_s - 3 \right).
\end{aligned}$$

Данные результаты позволяют сделать вывод, что полученные в результате математического моделирования формулы можно приме-

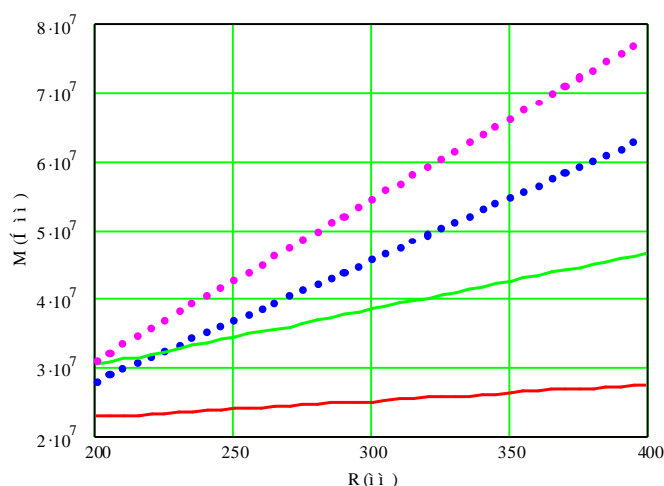


Рис. 3. Графики зависимости момента от радиуса колеса при разных коэффициентах трения ($\sigma_s=400$ МПа)

нять для оценки момента на приводном колесе при проектировании технологической оснастки непрерывного равноканального прессования способом Конформ, для получения длинномерных изделий поперечного сечения, равного 12×12 мм, а также проследить влияние каждого фактора на этот силовой параметр процесса.

Библиографический список

1. Корнилов В.Н. Непрерывное прессование со сваркой алюминиевых сплавов. Красноярск: Изд-во пед. ин-та, 1993. 216 с.
2. Рыбин Ю.И., Рудской А.И., Золотов А.М. Математическое моделирование и проектирование технологических процессов обработки металлов давлением. СПб.: Наука, 2004. 644 с.

УДК 519.8:621.7

А. А. Минаев, Е. Н. Смирнов, И. В. Лейрих, В. В. Зуб

ИССЛЕДОВАНИЕ И МАТЕМАТИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ФОРМОИЗМЕНЕНИЯ ПОР В НЕПРЕРЫВНО-ЛИТОМ МЕТАЛЛЕ ПРИ ПЛАСТИЧЕСКОЙ ДЕФОРМАЦИИ

Одним из условий успешной хозяйственной деятельности и развития металлургической отрасли в Украине является производство конкурентоспособных высококоррентабельных видов продукции. Решение данной проблемы невозможно без постоянного роста объемов проката, произведенного из непрерывно-литых заготовок.

В то же время более широкое использование непрерывно-литой сортовой заготовки требует и дальнейшего проведения исследований, связанных с прогнозированием качества готовой металлопродукции. При этом существенное влияние на уровень служебных свойств оказывают дефекты заготовки, связанные с процессом непрерывной разливки, и в первую очередь поры, размер которых в ряде случаев достигает миллиметра и более. Известно, что большое их количество существен-

ным образом снижает деформируемость стали при последующем волочении [1], а предварительная деформация непрерывно-литого металла не всегда способствует их залечиванию [2–4].

Целью настоящей работы является оценка возможности прогнозирования поведения пор в непрерывно-литом металле при пластической деформации с использованием современных методов математического моделирования.

В качестве объекта исследования была выбрана технология производства сварочной проволоки (сталь 07Г1НМА) из непрерывно-литой заготовки, произведенной в условиях высокой скорости сортовой МНЛЗ ЗАО «ММЗ «Истил-Украина» [5].

В рамках единой технологической цепочки «сталь–прокатка катанки–волочение» («С–ПК–В»)

исходная непрерывно-литая заготовка сечением 150×150 мм была прокатана на стане 150 ОАО «Макеевский металлургический завод» в катанку диаметром Ø5,5 мм по действующему технологическому регламенту. Полупродукт уровня технологических связей «Прокат» (катанка Ø5,5 мм) передали для последующего волочения в сварочную проволоку Ø4 мм с медным покрытием на ОАО «Силур» (уровень технологических связей «Металлопродукция»). Конечным потребителем продукции являлось ОАО «Харьцызский трубный завод».

Для изучения динамики формирования макро- и микроструктурных изменений в процессе деформации вдоль всей технологической схемы (начиная от непрерывно-литой заготовки и заканчивая сварочной проволокой) отбирали контрольные пробы для последующего изготовления образцов. Кроме того, на уровне технологических связей «Прокат» дополнительно были отобраны пробы от недокатов, которые имели различную степень вытяжки от исходного сечения (см. таблицу).

В ходе исследования сквозной контроль вдоль технологической системы «С-ПК-В» осуществляли на плавках различного химического состава общим весом более 400 т.

В металле исследованных плавков содержание химических элементов (в среднем) составило:

Суммарный коэффициент вытяжки, форма и размеры раскатов в точках контроля технологии системы «сталь – прокатка катанки – волочение»

Уровень технологических связей	Форма раската	Размеры, мм		Суммарный коэффициент вытяжки μ_{Σ}	Параметр контроля технологии
		В	Н		
Сталь	Квадрат	150,0	150,0	-	Макро- и микроструктура
Прокатка катанки	Овальное сечение	54,0	48,0	10,0	Макро- и микроструктура
	Овальное сечение	31,0	26,0	34,0	Макро- и микроструктура
	Круг	18,0	18,0	88,0	Макро- и микроструктура
	Круг	5,5	5,5	915,0	Макро- и микроструктура, механические свойства
Металлопродукция	Круг	4,0	4,0	1790,0	Макро- и микроструктура, механические свойства

C<0,08%; Mn=1,0...1,5%; Si=0,2...0,45%; Cr<0,3%; Ni=0,5...0,7%; Mo=0,6...0,85%; Cu<0,2%; S<0,01%; P<0,015%; As<0,5%; Al<0,005%; N<0,01%. Такой состав стали соответствует требованиям стандарта на заготовку для сварочной проволоки.

Контроль качества макроструктуры исходной непрерывно-литой заготовки (рис. 1) на поперечных (а) и продольных (б) темплетах показал, что вблизи поверхности исходной заготовки после горячего травления обнаружены относительно мелкие (~1 мм) единичные подкорковые пузыри, расположенные по периметру преимущественно в приповерхностных участках [6, 7]. Центральная пористость была выражена слабее, а ликвационные участки не наблюдались. Загрязненность стали неметаллическими включениями в целом низкая. В частности, количество сульфидов оценено в 0,5 балла по ГОСТ 1778-70. Более высоким было количество строчечных оксидов, особенно в осевой области – ОС2–ОС3.

Контроль параметров макроструктуры в раскатах уровня технологических связей «Прокатка катанки» (рис. 2) показал, что при степени суммарной вытяжки $\mu_{\Sigma}=10$ еще наблюдаются отдельные поры. По форме они значительны уже по отношению к своим первоначальным размерам и локализуются на расстоянии равном 1/2 радиуса заготовки.

При дальнейшем увеличении вытяжки (более $\mu_{\Sigma}=88$) большинство дефектов, оценка которых предусмотрена стандартами, не выявлены или проявились незначительно. В ходе исследования макроструктуры недокатов и катанки выявлено несколько зон с различным характером загрязненности неметаллическими включениями. Для геометрического центра заготовки характерна незначительная загрязненность и пористость. Более крупные поры и неметаллические включения располагаются ближе к поверхности и имеют вытянутую (по направлению деформации) форму. В районе предполагаемого теплового центра сосредоточено относительно большее количество мелких круглых и больших пластинчатых сульфидов. С ростом вытяжки неметаллические включения дробятся и вытягиваются в соответствии с направлением деформации, а ближе к оси заготовки более крупные включения сохраняют свою форму.

В целом проведенное исследование показало, что поры имеют тенденцию к сохранению на всех звеньях уровня «прокатка катанки», вплоть до готовой продукции (суммарная вытяжка $\mu_{\Sigma} = 915$). При этом они плохо выявляются на поперечных, а хорошо – на продольных шлифах. По мере увеличения степени вытяжки от $\mu_{\Sigma} = 10$ до 88 размер пор существенно уменьшился: в среднем от 180 до 40 мкм. Однако и после при-

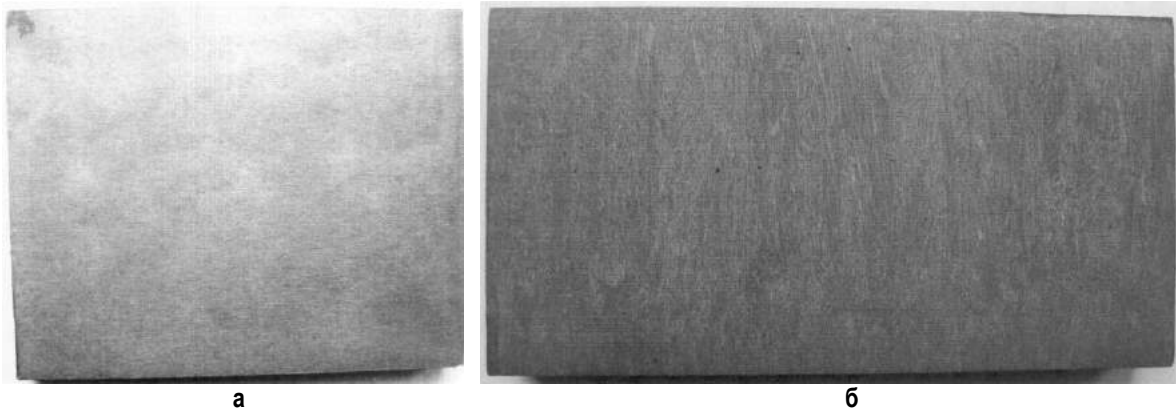


Рис. 1. Макроструктура непрерывно-литой заготовки сечением 150×150 мм:
а – поперечный шлиф; б – продольный шлиф

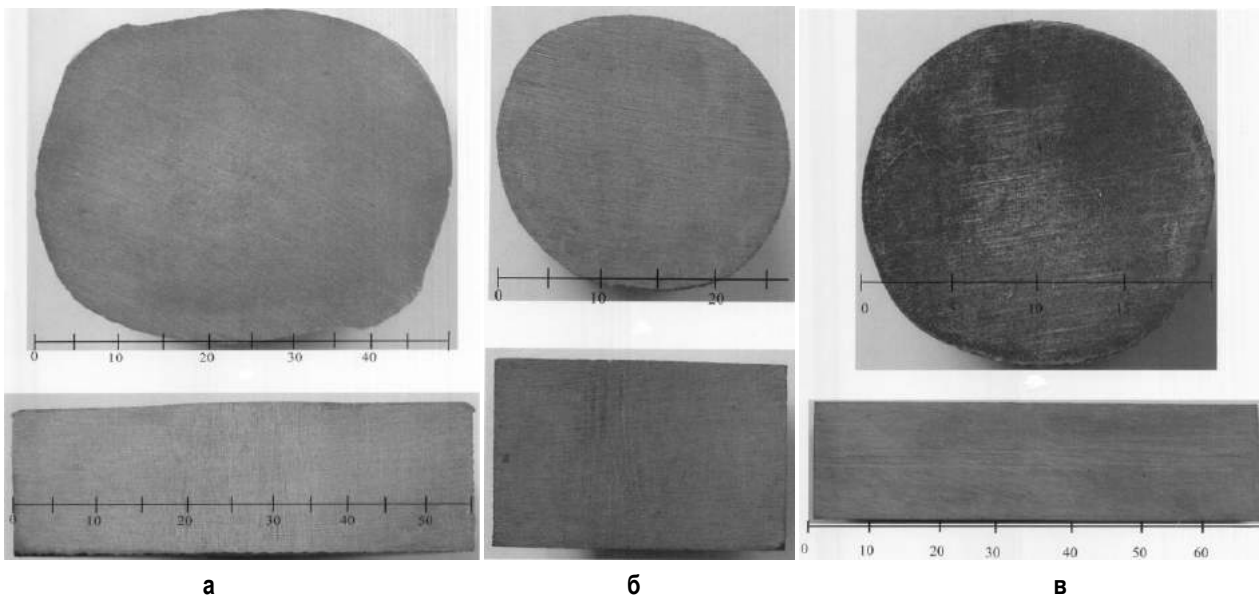


Рис. 2. Макроструктура промежуточных раскатов уровня технологических связей «прокатка катанки»:
а – $\mu_{\Sigma} = 10$; б – $\mu_{\Sigma} = 34$; в – $\mu_{\Sigma} = 88$

ложения большей вытяжки сохранялись отдельные поры с размерами порядка 100 мкм, т.е. отсутствовал процесс их заварки в ходе прокатки. Им также свойственна тенденция к вытягиванию по направлению деформации и стремление принять форму, подобную цилиндрической.

Выявленный характер поведения пор в процессе пластической деформации был в дальнейшем использован как при разработке математической модели, так и при последующей проверке ее адекватности. В соответствии с целью данной работы моделирование процесса деформации металла с наличием пор было выполнено с использованием метода конечных элементов (программный пакет ANSYS). С учетом имеющихся литературных данных [8] при создании модели использовали трехмерное объемное тело.

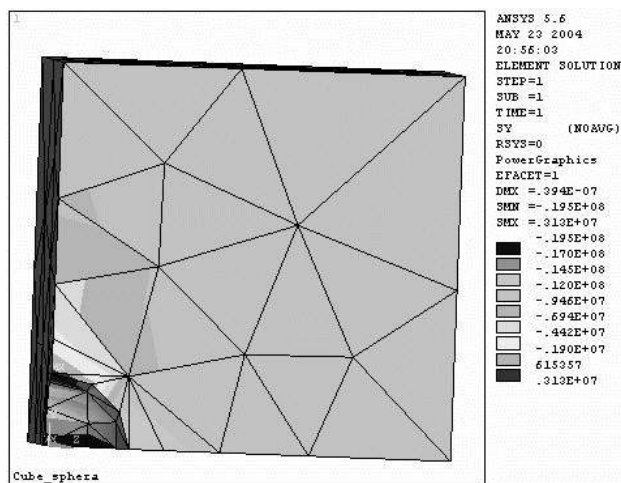
Для получения реального решения необходимо корректно выбрать размеры поры и фрагмента окружающего материала. Согласно рекомендаций работы [9] для получения точного ре-

шения желательно, чтобы линейный размер фрагмента тела был в 5–10 раз больше диаметра поры. С учетом результатов металлографического анализа были выбраны следующие размеры и форма пор на различных стадиях процесса:

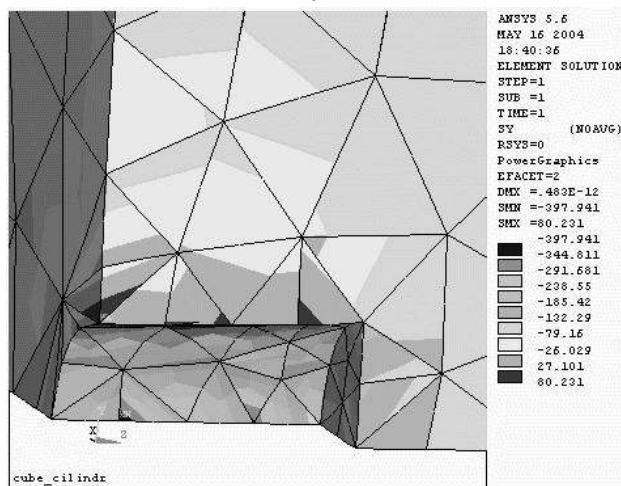
- а) поры, имеющие изначально сферическую форму с диаметром на уровне 200 мкм (0,0002 м);
- б) поры, характерные для деформированного материала и имеющие условный вид цилиндра диаметром около 200 мкм (0,0002 м) и длиной около 400 мкм (0,0004 м).

Для вышеуказанных размеров пор соответствующий фрагмент твердого тела имел форму куба со стороной 1000 мкм (0,001 м). Учитывали температурную зависимость диаграммы деформации методом билинейной кинетики.

На рис. 3 представлены результаты расчета напряжений, возникающих при деформации сфероподобной и цилиндрической пор. Данные результаты получены для величины нагружения, изменяющейся в пределах $P=1 \times 10^6 \div 1 \times 10^8$ Па.



а



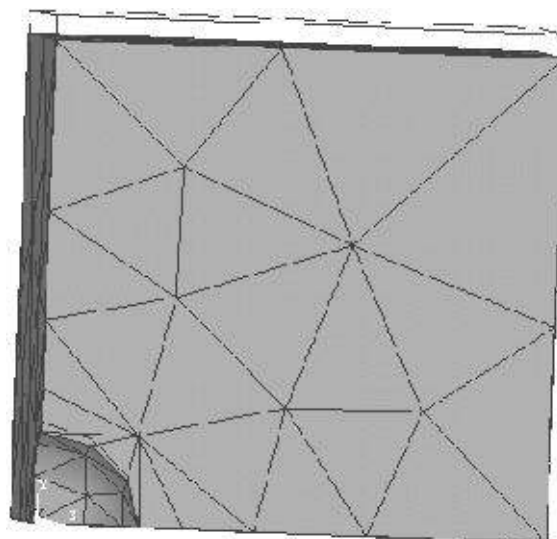
б

Рис. 3. Распределение напряжений в сферической (а) и цилиндрической (б) порах

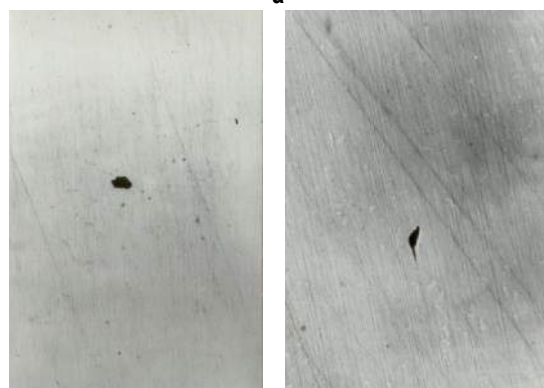
Такой уровень нагружения обеспечивал линейную деформацию δ порядка 5–10%.

Анализ приведенных данных показывает, что возникающее вокруг сфероподобной и цилиндрической пор поле напряжений имеет неоднородный характер, а именно присутствуют участки положительных напряжений (растягивающих) в общей массе сжимающих. Применительно к условиям сфероподобной поры зона растягивающих напряжений сконцентрирована в одной из условных вершин (рис. 3, а), расположенной перпендикулярно к действию силы прокатки. В то же время для цилиндрической поры (рис. 3, б), характерно возникновение участков с растягивающими напряжениями вдоль всей длины поры. При этом на узких гранях действуют сжимающие напряжения.

Выявленные различия в распределении напряжений отражаются и на характере деформированного состояния. Сфероподобная пора имеет характер деформации, при котором сжатие происходит преимущественно по одной оси. Форма деформированной поры приближа-



а



б

Рис. 4. Распределение деформаций в сферической поре при прокатке (а) и макроструктура деформированной стали (не травлено) (б); б – $\mu_z=34, \times 100$ – поверхность

ется к вытянутой эллиптической (рис. 4, а).

Что касается поведения цилиндрических пор, которых согласно данным металлографических исследований большее число, то можно сказать, что с ростом силы прокатки возрастает и уровень напряжений вокруг них. Однако характер их распределения принципиально не меняется (рис. 4, б): первоначально происходит деформация средних участков с соответствующим сближением границ (см. рис. 3, б). Данная особенность подтверждается и металлографическими исследованиями (рис. 5, в). В то же время боковые поверхности пор остается в недеформированном или слабodeформированном состоянии. При дальнейшем росте степени деформации начинают искажаться и боковые стороны (рис. 5, б).

Анализ распределения потоков материала при деформации (рис. 6) показывает, что во внутреннюю область поры попадают потоки, которые отличаются один от другого по интенсивности. Применительно к условиям сфероподобной поры металл затекает во внутреннюю часть преимущественно с одной стороны. По-

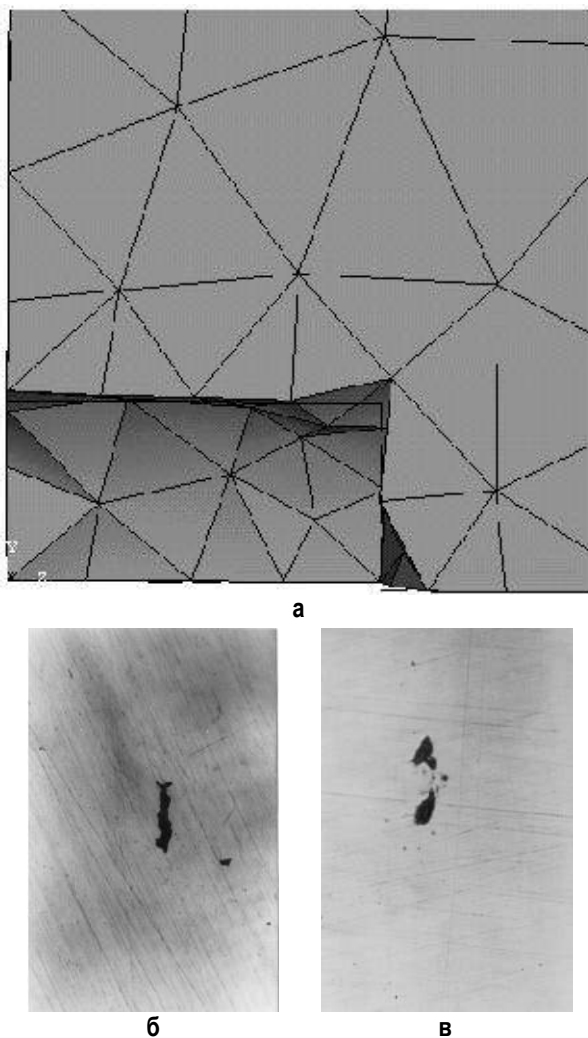


Рис. 5. Распределение деформаций в цилиндрической поре при прокатке (а) и макроструктура деформированной (не травлено) стали 07Г1НМА: б – $\mu_z=34, \times 100$ – поверхность; в – $\mu_z=950, \times 500$ – центр

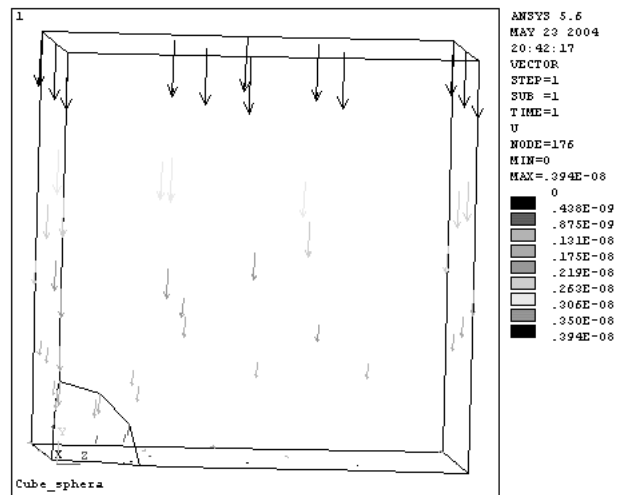
токи с других сторон значительно меньше.

Для цилиндрической поры наиболее характерен интенсивный массоперенос в области средних участков длинной грани. Проведенное моделирование показало, что несмотря на значительный рост нагрузок добиться полного закрытия пор во многих случаях не представляется возможным. При очень больших величинах давления наблюдалась разрывность решения.

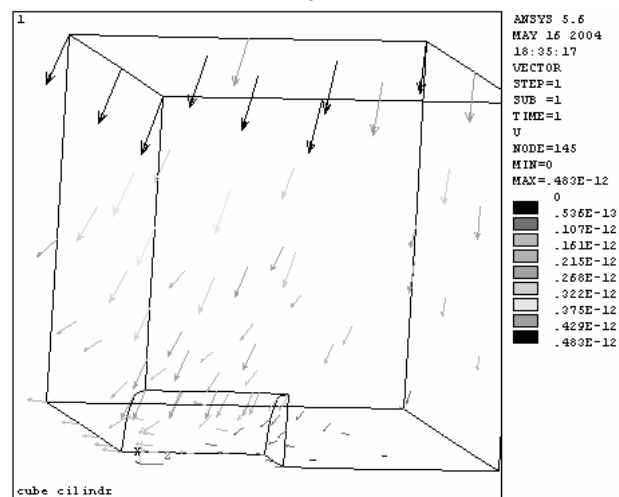
Выполненные в дальнейшем контрольные металлографические исследования подтвердили результаты математического моделирования в части невозможности полной заварки пор. При больших величинах давления в ряде случаев поры приобретают сильно вытянутую форму с острыми краями.

Библиографический список

1. Колмогоров В.Л. Механика обработки металлов давлением. М.: Металлургия, 1986. 688 с.
2. Ефимов В.А. Разливка и кристаллизация стали. М.: Металлургия, 1976. 552 с.
3. Журавлев В.А. О макрокопической теории кристаллизации сплавов // Металлы. 1975. № 5. С. 93–99.



а



б

Рис. 6. Распределение потоков стали при деформации сферической (а) и цилиндрической (б) пор

Выводы

На основании проведенных металлографических исследований определены закономерности затекания при пластической деформации металла в поры, образовавшиеся при непрерывной разливке стали. С использованием современного математического аппарата, базирующегося на методе конечных элементов, разработана модель, позволяющая исследовать динамику поведения сфероподобных и пор цилиндрической формы в процессе пластической деформации. Путем сопоставления результатов расчета с данными металлографических исследований показана как хорошая адекватность разработанной модели, так и перспективность использования метода конечных элементов для исследования процесса деформации неоднородного материала.

4. О кинетике порообразования при кристаллизации трехкомпонентных сплавов в двумерной области / В.А. Журавлев, С.С. Савинский, Г.А. Ильин и др. // *Металлы*. 1980. № 1. С. 74–79.
5. Освоение производства непрерывно-литой заготовки на высокоскоростной шестиручьевой МНЛЗ / Хашим Саед Раза, Г.И. Касьян, В.Г. Осипов и др. // *Металл и литье Украины*. 2001. № 5–6. С. 19–21.
6. Атлас дефектов стали: Пер.с нем. М.: Металлургия, 1979. 188 с.
7. Дефекты стали. Справочник / Под ред. С.М. Новокщеновой, М.И. Виноград. М.: Металлургия, 1984. 199 с.
8. Luo Chunhui Evolution of voids close to an inclusion in hot deformation of metals // *Comput. Mater. Sci*. 2001. V. 21. № 3. P. 360–374.
9. Моделирование формоизменения внутренних дефектов при объемной деформации материалов с разными реологическими свойствами / А.А. Миленин, В.Т. Подвисоцкий, Д.С. Светличный и др. // *Металлургическая и горнорудная промышленность*. 2001. № 6. С. 37–40.

УДК 621.771

С. Ф. Рашников, Ю. А. Щербо, И. В. Ситников, А. Ю. Сычев, М. В. Чукин

ПОВЫШЕНИЕ КАЧЕСТВА СТАЛЕМЕДНОЙ ПРОДУКЦИИ И СОВЕРШЕНСТВОВАНИЕ ТЕХНОЛОГИИ ТВЕРДОФАЗНОГО СОЕДИНЕНИЯ КОМПОНЕНТОВ БИМЕТАЛЛА

На современном этапе развития науки и техники слоистые металлы находят все более широкое применение в различных отраслях промышленности, в частности на железных дорогах, городском электротранспорте, в электротехнике и электронике, благодаря тому, что слоистая композиция сочетает в себе высокие электропроводные и прочностные свойства. Слоистые проводники имеют, как правило, меньшую массу и более высокую коррозионную стойкость при минимальном расходе дорогостоящих цветных металлов. Так, сталемедная проволока с массовым содержанием меди от 20 до 70% используется в качестве проводниковых и силовых элементов подвески контактной сети электрифицированных железных дорог, телефонных проводов, специальных микрокабелей, авиа- и сейсмографических кабелей, выводов радиодеталей и компо-

нентов электронной техники.

Вместе с тем, к слоистым проводниковым металлам, в частности к широко используемой сталемедной биметаллической проволоке, предъявляются все более жесткие требования по качеству, особенно при применении в изделиях, предназначенных для оборонной промышленности и авиации. Поэтому повышение качества данного вида продукции является весьма важной и актуальной задачей для всей экономики Российской Федерации.

Основными показателями качества, определяющими эксплуатационные свойства сталемедных проводников, являются:

1. Прочное соединение медной оболочки со стальным сердечником, обеспечивающее совместную деформацию компонентов без разрушения медного слоя при действии на проводник знакопеременных изгибающих и растягивающих напряжений в процессе эксплуатации.

2. Минимальная разнотолщинность медной оболочки по периметру и длине проводника, обеспечивающая стабильность электропроводных свойств.

3. Плотная и равномерная структура медной оболочки, обеспечивающая высокую коррозионную стойкость проводника в неблагоприятных условиях эксплуатации.

Обобщая требования стандартов к показателям качества сталемедной проволоки, структуру качества данного вида продукции можно изобразить в виде схемы, приведенной на рис. 1.

Обеспечение высокого уровня приведенных показателей качества сталемедных проводников, особенно тонких размеров (диаметром от 1 мм и ниже), определяется, в



Рис. 1. Структура качества сталемедной проволоки