

ДЕФЕКТЫ ПРОКАТА РЕОЛОГИЧЕСКИ СЛОЖНЫХ СТАЛЕЙ*Государственная металлургическая академия Украины*

Показано, что склонность углеродистых сталей к деформационному динамическому разупрочнению является одной из причин повышенного дефектообразования проката. Раскрываются не установленные ранее причины формирования концевых накатов при прокатке на обжимных станах, причины двухбочкообразности уширения и морщин, дефектов макроструктуры и др.

В середине 60-тых годов Днепропетровским металлургическим институтом (ДМетИ) на протяжении ряда лет выполнялась комплексная научно-исследовательская работа по повышению качества проката. Решалась крупная проблема раскрытия и устранения причин возникновения дефектов трубной заготовки и труб, производимых на предприятиях металлургической отрасли Украины. Исследования проводились на заводах им.Дзержинского, им. Петровского, им. Ленина, им. К. Либкнехта, Южнотрубного и др. К работе были привлечены коллективы ведущих кафедр, возглавляемых учеными с мировыми именами: академиками Чекмаревым А.П., Стародубовым К.Ф., профессорами Ростовцевым С.Т., Лапицким В.И., Тайцем Н.Ю. Одно из основных направлений – металловедческое – возглавил К.Ф. Стародубов. Именно его коллективу предстояло решить главную задачу: на основе обобщения результатов исследований раскрыть природу дефектообразования и разработать способы его предупреждения. На систематических семинарах-оперативках, проводимых в ДМетИ и в цехах предприятий, К.Ф. Стародубов своим негромким, но убедительным голосом напоминал нам, молодым научным сотрудникам, о том, что исследование дефектов проката нужно осуществлять в неразрывной связи со свойствами, строением и особенностями течения каждой конкретной марки стали. В такой постановке задача обретала фундаментальный характер и предполагала необходимость развития малоизвестной тогда научной дисциплины – реологии металлов, перебрасывающей феноменологический мостик между микродискретной металлофизикой и интегральными процессами обработки металлов давлением. В те годы были решены многие задачи, раскрывающие природу формирования дефектов при прокатке, но ряд из них находит свое решение лишь сейчас в связи с развитием реологии и пластометрии металлов.

Общие вопросы реологии металлов.

В современном понимании реология металлов – это раздел общей науки о течении вещества, изучающий взаимосвязь между напряжениями

и деформациями в металле при его пластическом формоизменении. В рамках феноменологического подхода поликристаллические металлы и их сплавы в реологии рассматриваются как квазиоднородные сплошные среды, содержащие анизотропные диспергированные частицы (кристаллиты) всевозможных ориентаций. Предметом изучения реологии являются также и интегральноанизотропные металлы, текстурированные, например, холодной прокаткой. Главной задачей реологии металлов является определение сопротивления их деформации – истинного предела текучести – в зависимости от параметров деформирования. В общем виде реологическое уравнение имеет вид сложного функционала:

$$T = \Phi [H, \Lambda, t, \bar{\epsilon}(\tau), \chi, \dots], \quad (1)$$

где H – интенсивность скоростей деформаций сдвига; $\Lambda = \int_0^t H d\tau$ –

степень деформации; t – температура; $\bar{\epsilon}(\tau)$ – функция развития деформации во времени; χ – параметры физико-химического взаимодействия деформируемого металла со средой.

С достаточной обоснованностью для практических целей вместо функционала (1) используют функцию вида

$$\sigma = f(\bar{\epsilon}, \dot{\epsilon}, t), \quad (2)$$

где σ – сопротивление деформации; $\bar{\epsilon}$ – истинная (логарифмическая) степень деформации.

Многочисленные попытки конкретизировать вид уравнения (2) с позиций атомарно-дислокационных, энергетических и др. не увенчались успехом. Поэтому для конкретной реализации уравнения (2) сопротивление деформации определяется только экспериментально – методами пластометрии (в иностранной литературе – реометрия). Результаты, полученные в условиях однородности пластического течения металлов при постоянных температурах и скоростях деформации, представляются в графическом виде семействами кривых $\sigma - \bar{\epsilon}$ и общепризнанными справочными [1-3]. Эти данные являются исключительно важными, так как содержат в полном объеме информацию обо всех механизмах и явлениях, сопровождающих пластическое формоизменение металла [4].

Прямая и обратная задачи реологии металлов

До настоящего времени в теории пластического формоизменения металлов (да и в практике пластометрии) решалась прямая задача: определялось сопротивление деформации σ согласно уравнению (2). Конечной целью такого решения были расчеты технологических усилий и энергетических затрат, необходимых для деформирования металла. Актуальность этого направления к настоящему времени исчерпывается в связи с возрас-

тающей необходимостью управления свойствами изделий, получаемых методами ОМД, и все обостряющейся необходимостью сбережения энергетических ресурсов. Первостепенное значение обретает решение обратной задачи реологии:

$$\bar{\epsilon}(\tau) = \Phi[\sigma(\tau), \dot{\epsilon}, t, \dots], \quad (3)$$

т.е. все более важным становится определение закономерностей течения металла прежде всего в зависимости от особенностей реологических свойств этого металла при известных скоростях деформации и температурах.

Возможность обратного решения основной задачи реологии металлов до настоящего времени только декларировалась в теоретических разработках [5,6]. В практике экспериментальных исследований так задача даже не ставилась.

Реологическая сложность реальных металлов и решение обратной задачи реологии.

Анализ справочной информации о реологических свойствах реальных металлов и сплавов, накопленной в мировой практике пластометрии, позволил заключить, что:

- преобладающее большинство металлов и сплавов отличается реологической сложностью, т.е. склонностью к аномальному динамическому разупрочнению, выражающемуся в наличие одного, двух, трех и более экстремумов на реологических кривых $\sigma - \bar{\epsilon}$;
- характер реологических кривых $\sigma - \bar{\epsilon}$ реальных металлов зависит (за небольшим исключением) только от степени деформации.

На рис. 1 приведены семейства кривых $\sigma - \bar{\epsilon}$ реологически сложного металла – стали 45.

Установление экспериментальными методами указанных особенностей свойств металлов позволило подойти к решению обратной задачи реологии такой постановке:

«Каковы закономерности течения металлов различной рео-

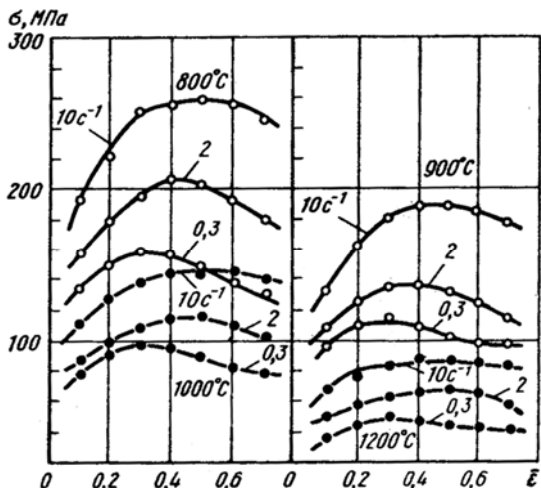


Рис. 1. Реологическая сложность стали 45 [2]

логической сложности?»

Обширные исследования, выполненные в этом направлении, привели к неожиданным результатам [7-9].

На рис. 2. представлены обобщенные результаты изучения закономерностей развития деформаций образцов металлов с различными реологическими свойствами.

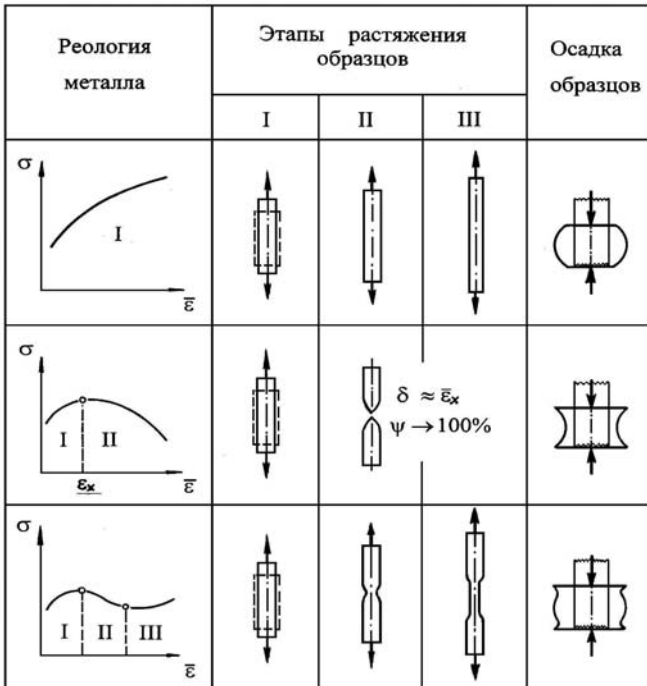


Рис. 2. Зависимость закономерностей развития деформации образцов от реологической сложности металлов в условиях стандартных испытаний

В условиях стандартных испытаний пластическим растяжением образцов прямоугольного сечения, а также пластическим сжатием (при одинаковых контактных условиях), цилиндрических образцов был обнаружен ряд неизвестных ранее закономерностей течения металлов и явлений их сопровождающих [10]. Экспериментально изучены и объяснены не наблюдавшиеся ранее: явление деформационных аномалий высших порядков при пластическом растяжении реологически сложных (РС) металлов, заключающееся в ускорении формирования шейки на образцах, обусловленном локальным разупрочнением металла, или в замедлении этого процесса с формированием равномерно удлиненной шейки, обусловленного

локальным вторичным упрочнением металла; явление деформационной анизотропии разупрочнения РС металла, проявляющееся в ускорении его течения в направлении большей главной деформации и др. Главным же выводом исследований было установление существенной значимости зависимости закономерностей развития деформаций во времени от степени реологической сложности пластически деформируемого металла.

Влияние реологической сложности металла на формирование дефектов проката.

Исследования проводились на специально разработанном лабораторном комплексе [10], позволяющем осуществлять физическое моделирование процессов ОМД в соответствии с требованиями теории подобия с привлечением современных методов экспериментальной механики – муар, поляризационно-оптического, пластометрии, тензометрии, киносьемки. Предварительно были разработаны легкодеформируемые свинцовые сплавы – модели реальных сталей различной реологической сложности [11].

Обоснованное физическое моделирование впервые позволило процесс прокатки слитков на блюминге воспроизвести в лабораторных условиях с высокой степенью подобия. Прокатывались образцы – модели слитков – из Pb-сплава, реологически подобного стали 45.

Методом муаровых полос было установлено, что естественная исходная неравномерность деформации при прокатке высоких полос (резко усиливается) с усложнением реологии металла характер его течения изменяется принципиально. Приконтактные объемы металла деформируются в условиях несравненно более высоких интенсивностей скоростей деформации N , чем глубинные. Они разупрочняются и текут с большей скоростью в сторону свободной поверхности переднего торца полосы, формируя в ярковыраженный накат (рис. 3).

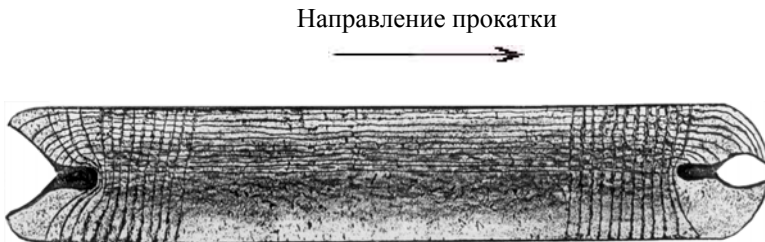


Рис. 3. Концевые накаты на модели блюма, полученного прокаткой в одном направлении за 3 прохода без кантовки с обжатиями по $\approx 20\%$ за проход

Причиной этому являются обнаруженные вблизи контакта с валками в начале высокого очага деформации области ядер $H_{\max}$ (максимальной

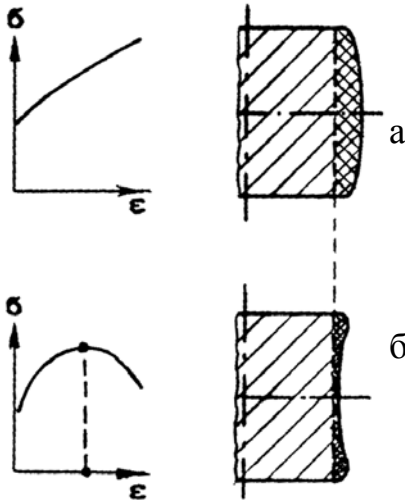


Рис. 4. Уширение высотой полосы ($H \times B \approx 1$) при прокатке реологически простого (а) и реологически сложного (б) металлов. Лабораторное физическое моделирование на Pb-сплаве, реологически подобном стали 45

интенсивности скоростей деформации), в которых реологически сложный металл, достигнув характеристической степени деформации, начинает разупрочняться и преимущественно течёт в направлении ближайшей свободной поверхности. В продольном направлении в начальной стадии формируется накат, в поперечном – на протяжении прокатки всего образца наблюдается двухбочкообразное уширение металла (рис. 4). На боковых гранях при этом образуются морщины (рис. 5). Сравнение (см. рис. 3 и рис. 5) в соответствующем геометрическом масштабе формы

и состояния поверхностей боковых граней модели раската (лабораторного образца) и натурального блюма показывает их близкое подобие.

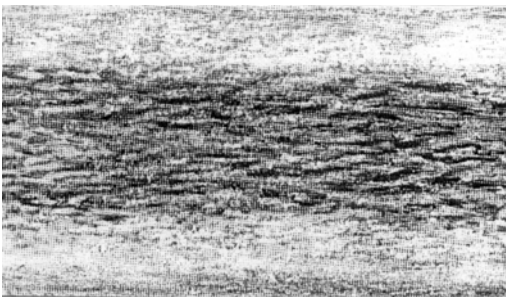


Рис. 5. Морщины на боковой поверхности блюма сечением 240×240 мм из стали 45

Следует заметить, что лабораторное моделирование процессов прокатки с соблюдением критериев подобия позволяет не только наглядно воспроизводить явления, внешне наблюдаемые на промышленном стане, но и использовать экспериментальные методы, позволяющие проникнуть вглубь металла, раскрывая невидимую сущность процесса.

Исследованиями в лабораторных условиях четко установлено, что при

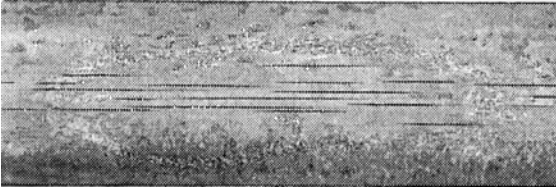


Рис. 6. Морщины, раскатанные в мелкие штриховые трещины на поверхности трубной заготовки $\varnothing 140$ мм

прокатке реологически простого металла, например чистого алюминия, явлений формирования наката и морщинообразования не наблюдается.

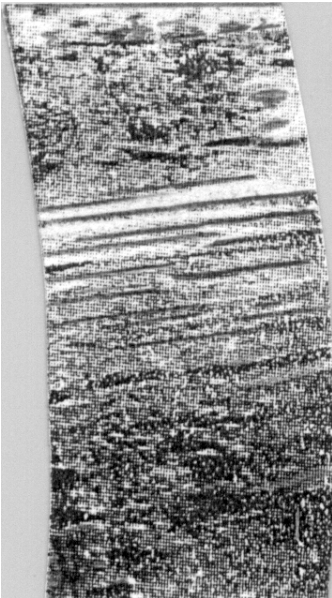


Рис. 7. Раскрытие трещин на гильзе после прошивки трубной заготовки на ТПА-140

Опыты по изучению развития морщин позволили установить, что при прокатке блюмов в трубную заготовку они превращаются в волосовины (рис. 6), а при дальнейшей прокатке на трубопрокатных агрегатах – в трещины на гильзах и на черновых трубах, приводя к браку (рис. 7).

Изучением распределения локальных параметров деформаций по глубине сечения раската при прокатке реологически сложного металла установлено, что центральные объемы металла в значительно меньшей степени продеформированны, чем поверхностные. Такая неравномерность деформации является причиной ухудшения качества макроструктуры проката, образования рыхлостей, разрывов.

Заключение

На основе изучения ненаблюдавшихся ранее закономерностей течения металла при пластическом формоизменении металлов со сложной реологией методами лабораторного физического моделирования и опытами на промышленных станах раскрыты причины формирования дефектов блюмов, трубных звяготовок, труб. Установлено, что формирование концевых накатов, двухбочкообразности уширения и морщин, волосовин и трещин может носить чисто реологический характер, что объясняется аномальным динамическим деформационным разупрочнением реологически сложного металла, существенно изменяющим характер его пластического течения.

1. Полухин П.И., Гун Г.Я., Галкин А.М. Сопротивление пластической деформации металлов и сплавов: Справочник. – М.: Металлургия, 1983. - 352 с.
2. Suzuki H. Report of the industrial science// University of Tokyo. - 1968.- Vol.18. - № 3. – 240 p.
3. *The Hot Deformation of Austenite/* Edited by J.B.Ballance. - New-York: AIME, 1977. - 631 p.
4. Кайбышев О.А. Пластичность и сверхпластичность металлов.- М.: Металлургия, 1975.- 280 с.
5. Работнов Ю.Н. Ползучесть элементов конструкций. – М.: Наука, 1966.- 752 с.
6. Применение теории ползучести при обработке металлов давлением / А.А. Поздеев, В.И. Тарновский, В.И. Еремеев, В.С. Бакашвили. – М.: Металлургия, 1973. - 192 с.
7. Shlomchack G.G., Mamuzic I., Vodopivec F. The Role of Contact Friction and Rheology in the Deformation at Plastometric Tests of Rheologically Complex Materials// Kovine, zlitine, tehnologije, letnik 28, Ljubljana. - 1994.- St.4.- P.579-582.
8. Shlomchak G.G., Mamuzic I., Vodopivec F. Deformation Anomalies of Higher Order during the Plastic Extention of Rheologically Complex Materials //Kovine, zlitine, tehnologije, letnik 28, Ljubljana.- 1994.- St.4.- S.583-587.
9. Shlomchak G.G., Melnik A.M., Mamuzic I. Reological complexity of metals and anomalies of their deformation // Metalurgija, vol. 35, Zagreb. – 1996. – Br. 2. – S. 83-86.
10. Шломчак Г.Г. Установление закономерностей деформирования металлов со сложной реологией методами физического моделирования: Дис... д-ра техн. наук: 05.03.05/ Нац. металл. академия.- Днепропетровск., 2000.- 343с.
11. Пат.20358 Україна, МКИ G 01 N 3/28, 11/00. Матеріал для моделювання деформаційних аномалій вищих порядків реологічно складних металів та сплавів/ Шломчак Г.Г.- № 95062682; Заявл. 06.06.95; Опубл. 27.02.98. Бюл. № 1.- 4 с.