

УДК 621.73.073

к.т.н. Дубасов В. М.

(ЛНУ им. В. Даля, г. Луганск, ЛНР, [dubasov1955@mail.ru](mailto:dubasov1955@mail.ru))

## ВЛИЯНИЕ ДЕФОРМАЦИОННО-ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ШТАМПОВЫХ СТАЛЕЙ

Определены режимы полугорячего выдавливания сталей 5Х3В3МФС, 4Х5МФС, 7Х3, 45Х, обеспечивающие получение высокой прочности и пластичности. Показано, что это достигается деформированием в интервале температур фазовых превращений за счёт сформированной в процессе деформации мелкозернистой перлитно-ферритной структуры, имеющей дисперсные равномерно распределённые, сфероидизированные и ориентированно расположенные карбидные частицы в перлите и тонкую субзернистую структуру в феррите. Структура устойчива, она наследуется при нагреве под термическую обработку и оказывает положительное влияние на свойства термообработанной стали.

**Ключевые слова:** выдавливание, фазовые превращения, структура, свойства, нагрев, перлит, сталь.

**Проблема и её связь с научными и практическими задачами.** Экономия материала и снижение энергетических затрат в технологических процессах объёмного деформирования относятся к актуальным задачам современного штамповочного производства. Одним из путей решения этих задач является применение малоотходного и малоэнергоёмкого процесса полугорячего выдавливания.

Технологические процессы полугорячего выдавливания сталей, осуществлённые при температурах 600...800 °С, имеют преимущества по сравнению с холодной и горячей обработкой. Нагрев сталей до сравнительно невысоких температур не вызывает значительного окисления поверхности металла, повышает пластичность и снижает удельные усилия деформирования в 1,5...2 раза и более по сравнению с холодным выдавливанием [1], что даёт возможность обрабатывать высокопрочные легированные стали и получать точные заготовки, не требующие механической обработки. Особенностью процесса является наличие определённого эффекта упрочнения металла при совместном воздействии пластической деформации и температуры [1]. Вызываемые наклёпом изменения строения стали обычно устойчивые и сохраняются после двой-

ной фазовой перекристаллизации  $\alpha \rightarrow \gamma \rightarrow \alpha$ , поэтому предварительная пластическая деформация может играть существенную роль в формировании структуры аустенита при последующей термической обработке. На получение свойств оказывает влияние наследственная передача дефектов строения: плотность несовершенств, фрагментация структуры, а также измельчение аустенитного зерна [2].

**Постановка задачи.** Задачей экспериментальных исследований является более глубокое изучение протекающих при деформации и охлаждении процессов деформирования и изменения структуры металла и причин, вызывающих аномальное изменение механических свойств сталей после полугорячего выдавливания.

**Изложение материала и его результаты.** Выдавливание осуществляли на гидравлическом прессе, имеющем скорость рабочего хода 15 мм/с. Из заготовок диаметром 40 мм прямым способом выдавливали образцы с диаметром стержня 25,3 мм, что соответствовало степени деформации 40 %. Из таких заготовок получали стандартные образцы на растяжение с диаметром рабочей части 5 мм.

Исследуемые режимы интервала температур 600...800 °С разбиты на три группы:

1) пластическая деформация при температурах ниже критической точки  $A_{c1}$ ;

2) пластическая деформация с протеканием фазовых превращений в интервале температур  $A_{c1}-A_{c3}$ ;

3) пластическая деформация при температурах выше критической точки  $A_{c3}$ .

Схемы последних двух режимов можно отнести к вариантам термомеханической обработки с распадом деформированного аустенита по перлитному механизму.

Температура деформации при втором режиме принималась на 10...30 °C выше критической точки  $A_{c1}$ . При этих температурах структура стали аустенитно-ферритная. Нагрев до температуры 800 °C обеспечивал во всех сталях, кроме 4X5МФС, получение однородной аустенитной структуры, т. к. критические точки  $A_{c1}$  для сталей 5X3В3МФС, 4X5МФС, 7X3, 45X соответствуют температурам 790, 840, 770, 735 °C.

Микроструктуру образцов исследовали в световом микроскопе. Для травления применялся 4%-й раствор азотной кислоты в этиловом спирте.

Выполненные микроструктурные исследования показали, что чем больше легирована сталь, тем более значительные изменения наблюдаются в структуре при деформации и аустенитно-ферритном состоянии. Так, микроструктура стали 4X5МФС после деформации при температуре 600 °C имеет строчечную ферритно-перлитную структуру с величиной зерна 6–7 баллов. В процессе деформации, сопровождающейся фазовой перекристаллизацией  $\alpha \rightarrow \gamma$ , происходит измельчение зерна до 12-го балла и сфероидизация частиц цементита. Более значительные изменения после деформации при 800 °C наблюдаются в структуре стали 5X3В3МФС в сравнении с деформацией при 600 °C: структура становится почти перлитная с небольшими вытянутыми участками феррита, который остаётся непревращённым при температуре нагрева. Увеличение количества перлита свидетельствует о возрастании скорости превращения деформированного

аустенита в перлит. Это хорошо согласуется с данными работы [3], в которой показано, что в сталях подобного класса 35ХН5С деформация аустенита при температуре 800 °C сокращает период распада аустенита в 1,5, а при 600 °C — в 2 раза. В связи с увеличением скорости превращения выделяется меньше избыточного феррита, и поэтому количество перлита значительно возрастает. Микроструктура сталей приведена на рисунке 1.



а)  $\times 340$



б)  $\times 340$



в)  $\times 1000$

Рисунок 1 Микроструктура стали 5X3В3МФС после полугорячей деформации ( $\epsilon=40\%$ ):

а — температура 600 °C;  
б, в — температура 700 °C

При изучении строения перлита установлено, что в результате проведённой обработки при 800 °С в перлите наблюдается направленность цементитных пластин, повышение их дисперсности и сфероидизации, большая часть которых разворачивается в направлении наибольшего течения металла. Образование ориентированного перлита, по-видимому, можно объяснить и тем, что при нагреве до температуры намного выше  $A_{c1}$  сохраняется сильная неоднородность аустенита по углероду. В связи с этим после деформации и охлаждения наблюдается избирательное выстраивание карбидных пластин [7].

На рисунке 2 показаны изменения механических свойств сталей в зависимости от температуры выдавливания. С повышением температуры до 700 °С, а для стали 4Х5МФС — и до 800 °С, наблюдается понижение прочности и повышение пластичности за счёт протекающих процессов возврата и рекристаллизации.

При температуре выдавливания 600 °С уровень прочностных свойств довольно высок при достаточной пластичности. Вероятно, при этой температуре выдавливания преобладающее влияние на уровень прочностных свойств оказывают процессы, которые задерживают разрушение металла. Подобную картину упрочнения металла наблюдали при тёплой прокатке стали 60ХЗГ8Н8В в работе [4], авторы которой считают, что повышение прочности указанной стали в диапазоне температур 300...500 °С вызвано полигонизацией. Возможность полигонизации непосредственно в ходе пластической деформации в указанном интервале температур отмечалась и в работе [5].

Из рассмотрения зависимости свойств сталей от температуры (см. рис. 2.) видно, что появляются пороговые температуры, по достижении которых резко изменяются механические свойства. Проведение выдавливания в аустенитно-ферритном состоянии (стали 5ХЗВЗМФС и 7ХЗ при 800 °С, стали 45Х при 750 °С) приводит к скачкообразному увеличению  $\sigma_{0,2}$  сталей 5ХЗВЗМФС и

7ХЗ на 180 и 110 МПа по сравнению с выдавливанием при 600 °С, причём пластичность здесь незначительно снижается и остаётся на достаточно высоком уровне ( $\psi=30...40\%$ ). Кроме того, значение прочностных свойств стали 5ХЗВЗМФС после выдавливания при температуре 800 °С  $\sigma_{0,2}=1420$  МПа, почти такое же, как его величина после стандартной термической обработки (закалка и отпуск при 670 °С) —  $\sigma_{0,2}=1400...1500$  МПа. Для стали 4Х5МФС повышение прочностных свойств не наблюдается, вероятно, в связи с тем, что температура фазовых превращений  $A_{c1}$  для этой стали 840 °С.

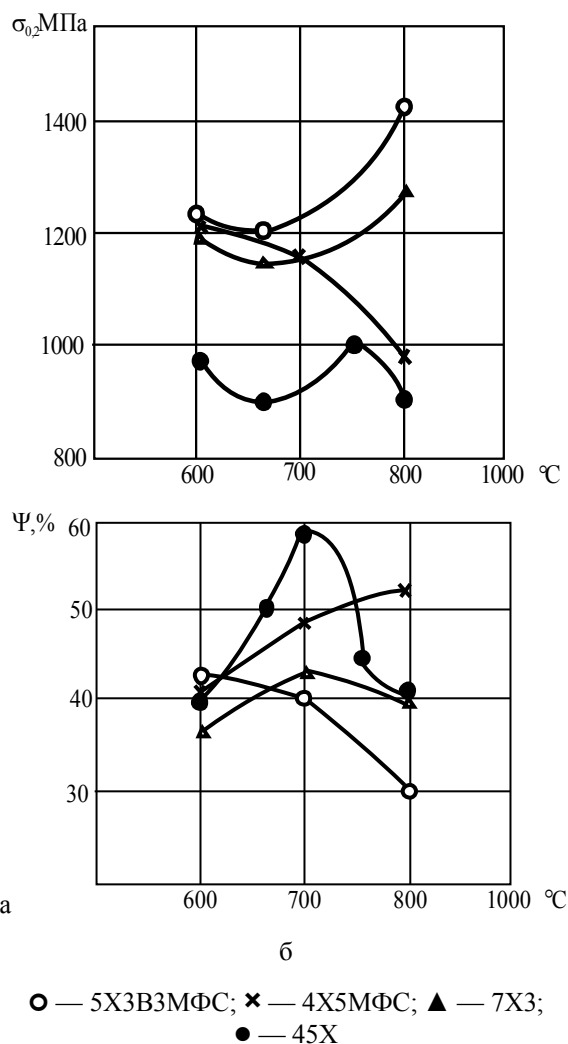


Рисунок 2 Зависимость механических свойств образцов после выдавливания со степенью деформации 40 % от температуры

Необходимо отметить одну особенность изменения относительного сужения после выдавливания стали 5Х3В3МФС (рис. 2, б). При температуре деформации 800 °С, несмотря на повышение характеристик прочностных свойств, относительное сужение изменяется незначительно. Это является свидетельством рационального формирования структуры и субструктуры металла при деформации в области фазовых превращений, которая позволяет, наряду с высокими прочностными свойствами, сохранять высокую пластичность.

Как следует из данных работы [1], ход кривых  $\sigma_{0,2}=f(t)$  не согласуется с температурной зависимостью удельных усилий выдавливания. При повышении температуры от 400 до 800 °С наблюдается монотонное снижение сопротивления деформированию сталей 12Х2Н4А и 20ХН3А, а после охлаждения прочностные свойства этих сталей, выдавленных при температурах 700...720 °С, находятся на уровне свойств после выдавливания при 400 °С. Это свидетельствует о том, что основные процессы упрочнения протекают не в период пластической деформации, а при охлаждении образцов. Наличие высоких степеней деформации и уровень гидростатического давления при выдавливании дают основание полагать, что в данном случае основа для получения повышенных прочностных характеристик закладывается в процессе пластического деформирования стали в области температур фазовых превращений за счёт деформирования субструктуры с повышенным содержанием дефектов. Вероятно, здесь действует механизм упрочнения, как при термомеханической обработке с деформацией во время перлитного превращения (ТМИЗО). По сравнению со сталью с ферритно-перлитной структурой, полученной после обычной горячей обработки давлением, сталь после ТМИЗО обладает более высоким пределом текучести и повышенной пластичностью. Согласно [6], такая обработка приводит к формированию тонкой субзёрненной структуры в феррите и замене карбидных пластин в перлите на дисперсные сферические равномерно распределённые частицы. Субзёрненная струк-

тура феррита формируется в результате полигонизации во время пластической деформации и в паузах между обжатиями. Дисперсные сферические частицы карбида могут зарождаться на дислокациях в аустените, а могут также появляться в результате фрагментации карбидных пластин и их сфероидизации, ускоренной деформацией. Существует оптимальная температура пластической деформации, выше которой субзёрна и карбидные частицы получаются крупнее, а ниже — не успевают сформироваться совершенные субзёрненные границы.

Подобный механизм упрочнения сталей имеет место при контролируемой прокатке [6]. Основная идея этой обработки заключается в подборе таких режимов деформации и охлаждения после неё, которые определяют получение мелкого однородного зерна и создание субструктуры во время и, главным образом, после горячей обработки. При этом оптимальный комплекс механических свойств получается в случае, когда феррит имеет фрагментированное полигональное строение, что достигается при температурах окончания прокатки ниже точки  $A_3$  [7]. Поскольку структура металла поковки после полугорячей штамповки в большинстве своём формируется в процессе охлаждения, то, по-видимому, скорость охлаждения будет влиять на окончательные свойства.

**Выводы.** После полугорячей деформации штамповых сталей в аустенитно-ферритном состоянии при оптимальной температуре и последующем охлаждении с определённой скоростью может быть получен комплекс механических свойств, отличающихся высокой прочностью и пластичностью. Это достигается за счёт сформированной в процессе деформации и охлаждения мелкозернистой перлитно-ферритной структуры, имеющей тонкую субзёрненную структуру в феррите и дисперсные, равномерно расположенные, сфероидизированные и ориентированно расположенные карбидные частицы в перлите. Структурные изменения повышают прочностные свойства тем более значительно, чем больше легирована сталь.

**Библиографический список**

1. Дорошко, В. И. Исследование влияния полугорячей пластической деформации на структуру и свойства легированных сталей [Текст] / В. И. Дорошко, Л. И. Карташова, В. М. Дубасов // Ресурсозберігаючі технології виробництва та обробки тиском матеріалів у машинобудуванні. — Луганськ : Вид-во СУДУ. — 1997. — С. 28–32.
2. Дорошко, В. И. Эффект наследования в деформированной стали 20Х [Текст] / В. И. Дорошко, Л. И. Карташова, А. А. Андришук // Металловедение и термическая обработка металлов. — 1979. — № 4. — С. 17–18.
3. Соколов, К. Н. Влияние пластической деформации на кинематику изотермического превращения аустенита [Текст] / К. Н. Соколов, Р. И. Энтин, В. М. Хлестов // Металловедение и термическая обработка металлов. — 1973. — № 1. — С. 11–13.
4. Богачева, Г. Н. Упрочнение стали 60ХЗГ8Н8В при тёплой прокатке [Текст] / Г. Н. Богачева, К. А. Малышев, В. Д. Садовский // Упрочнение сталей. — Свердловск, 1980. — С. 112–116.
5. Горелик, С. С. Рекристаллизация металлов и сплавов [Текст] / С. С. Горелик. — М. : Металлургия, 1978. — 577 с.
6. Бернштейн, М. Л. Структура деформированных металлов [Текст] / М. Л. Бернштейн. — М. : Металлургия, 1977. — 431 с.
7. Новик, И. И. Теория термической обработки металлов [Текст] : учебник / И. И. Новик. — [3-е изд., перераб. и доп.]. — М. : Металлургия, 1972. — 392 с.

© Дубасов В. М.

**Рекомендована к печати к.т.н., доц., зав. каф. ОМДиС ЛНУ им. В. Даля Стояновым А. А.,  
к.т.н., доц., зав. каф. ОМДиМ ДонГТУ Денищенко П. Н.**

Статья поступила в редакцию 08.10.18.

**к.т.н. Дубасов В. М.** (ЛНУ ім. В. Даля, м. Луганськ, ЛНР)

# **ВПЛИВ ДЕФОРМАЦІЙНО-ТЕРМІЧНОЇ ОБРОБКИ НА СТРУКТУРУ І ВЛАСТИВОСТІ ШТАМПОВИХ СТАЛЕЙ**

Визначено режими напівгарячого видавлювання сталей 5ХЗВЗМФС, 4Х5МФС, 7ХЗ, 45Х, що забезпечують отримання високої міцності і пластичності. Показано, що це досягається деформуванням в інтервалі температур фазових перетворень за рахунок сформованої в процесі деформації дрібнозернистої перлітно-феритної структури, що має дисперсні рівномірно розподілені, сфероїдизовані і орієнтовано розташовані карбідні частки в перліті і тонку субзернову структуру у фериті. Структура стійка, вона наслідуються при нагріванні під термічну обробку і позитивно впливає на властивості термообробленої сталі.

**Ключові слова:** видавлювання, фазові перетворення, структура, властивості, нагрівання, перліт, сталь.

**PhD Dubasov V. M.** (LNU after V.Dahl, Lugansk, LPR, dubasov1955@mail.ru)

# **INFLUENCE OF DEFORMATION-HEAT TREATMENT ON THE STRUCTURE AND PROPERTIES OF DIE STEELS**

There have been defined the modes of half-hot extrusion of steel 5Cr3W3MoVCi, 4Cr5MoVCi, 7Cr3, 45Cr, which ensure high strength and ductility. It is shown that this is achieved by deformation in the temperature range of phase conversions due to the fine-grained pearlite-ferrite structure formed in the deformation process, which has dispersed uniformly distributed, spheroidized and oriented carbide particles in perlite and a thin subgrain structure in ferrite. The structure is stable, it comes after heating under heat treatment and has a positive effect on the properties of heat-treated steel.

**Key words:** extrusion, phase transformations, structure, properties, heating, perlite, steel.