

## **ВЛИЯНИЕ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ И ГИДРОЭКСТРУЗИИ НА СТРУКТУРУ И СВОЙСТВА ВЫСОКОАЗОТИСТЫХ АУСТЕНИТНЫХ СТАЛЕЙ**

БОГДАНОВ В.А., ПАШИНСКАЯ Е.Г. (ДОНФТИ НАН УКРАИНЫ),  
СПУСКАНЮК В.З. (ДонГТУ), ЭФРОС Б.М. (ДОНФТИ НАН УКРАИНЫ)

*Изучено влияния условий термической обработки и гидропрессования на эволюцию структуры, изменение параметров деформационного упрочнения и свойства высокоазотистых аустенитных сталей. Определены условия получения высокопрочных состояний при деформационно-термической обработке данных сталей.*

Развитие современной техники тесно связано с применением новых высокопрочных материалов со специальными свойствами. Среди таких материалов особое место занимают высокоазотистые аустенитные стали (ВАС). Они являются принципиально новыми и обладают по сравнению с традиционными материалами рядом преимуществ, что вызывает к ним в последние годы повышенный интерес. Известно [1], что введение в аустенитную сталь азота и ее термомеханическая обработка позволяют экономить дорогостоящие легирующие элементы (например, по своей аустенитообразующей способности азот в 20 раз эффективнее никеля), существенно повысить прочностные свойства при сохранении пластических характеристик на высоком уровне в широком диапазоне температур. Кроме того, характерной особенностью ВАС является их высокая упрочняемость при холодной пластической деформации, обусловленная низким уровнем энергии дефектов упаковки в  $\gamma$ -фазе. Поэтому дальнейшее повышение физико-механических свойств этих сталей связано с использованием методов обработки давлением, среди которых одним из наиболее перспективных является холодное гидропрессование.

В качестве материала для исследования были выбраны аустенитная нержавеющая сталь X14Г10СФ с содержанием азота 0,023 и 0,45 вес.%. Сталь с высоким содержанием азота выплавлялась методом литья с противодавлением в атмосфере азота. Послековки, гомогенизирующего отжига и механической обработки образцы подвергались закалке в воду от температур 1050 до 1200°C и последующему старению при температурах 400–800°C с выдержкой до 10 ч.

Исходные (закаленные) образцы ВАС оксалатировались, смазывались порошком дисульфида молибдена, омыливались и гидропрессовались на установке прямого действия плунжерного типа. Степень деформации при гидропрессовании  $\ln R$  (где  $R$  — коэффициент вытяжки) варьировалась до 0,8. В процессе гидропрессования фиксировалось пиковое давление и давление установившегося режима.

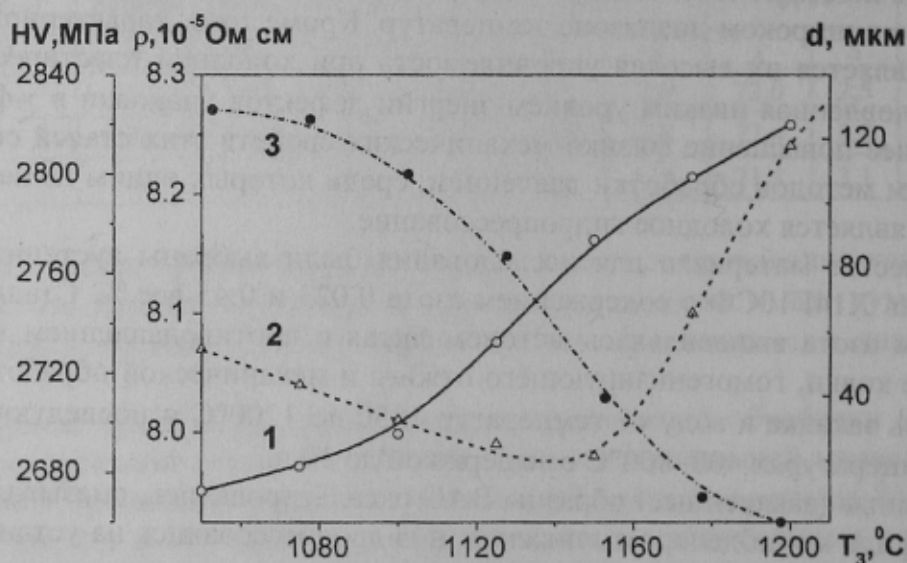
Структура стали исследовалась методами оптической микроскопии на приборе «Neophot-32». Фазовый анализ определяли рентгенографическим и магнитометрическим методами. ДюрOMETрические исследования проводились путем измерения твердости по Виккерсу на приборе ИТ-5010 с нагрузкой 294 Н.

Для количественной оценки изменения механических свойств гидропрессованной стали проводились испытания на одноосное растяжение. Из экструдатов изготавливались образцы диаметром 5 мм и длиной рабочей части 25 мм. Испытания осуществлялись на универсальной разрывной машине усилием 50 кН со средней скоростью деформации  $10^{-4} \text{ с}^{-1}$  в соответствии с ГОСТ 1497-84 при комнатной температуре.

Диаграммы деформации строились в координатах истинное напряжение ( $S$ ) — истинная деформация ( $e$ ) в интервале равномерной деформации растяжением. Для анализа кривых упрочнения использовалась модель Людвиговсона, описывающая пластическое течение поликристаллов, которая включала параметры, характеризующие структурное состояние и свойства материала.

Свойства ВАС очень сильно зависят от предварительной термической обработки, так как их структура после закалки существенно влияет на процессы, происходящие при последующих пластической деформации и дисперсионном твердении.

Структурные исследования ВАС в исходном (закаленном) состоянии показали, что они имеют однородную аустенитную структуру со средним размером зерна 20–120 мкм и относительно невысокую плотность дислокаций (рисунок 1). Значительное количество дислокаций расщеплено на частичные дислокации Шокли с протяженными дефектами упаковки между ними [2]. Наличие двойников отжига и расщепленных дислокаций свидетельствует о невысоких значениях энергии дефектов упаковки (ЭДУ) в исследуемых сталях. Никель и углерод приводят к ускорению процессов поперечного скольжения дислокаций в дефектной структуре и повышению ЭДУ. В то же время хром, марганец, кремний и азот способствуют тенденции снижения ЭДУ. С ростом концентрации азота в исследуемых сталях количество двойников отжига и степень расщепленности дислокаций увеличиваются, что свидетельствует о понижении величины ЭДУ и создает дополнительные возможности для повышения прочностных характеристик.



**Рисунок 1** — Изменение свойств ВАС от температуры закалки: 1 — средний размер зерна ( $d$ ); 2 — удельное электросопротивление ( $\rho$ ); 3 — твердость по Виккерсу ( $HV$ )

Известно [1], что электросопротивление является структурночувствительной характеристикой стали и служит показателем перенасыщения  $\gamma$ -твердого раствора карбидо- и нитридообразующими элементами. Анализ кривых изменения удельного электросопротивления, среднего размера зерна аустенита и твердости в зависимости от температуры закалки позволяет сделать вывод о наличии для исследуемых сталей оптимальной температурной области в районе 1100–1130°C (рисунок 1). Действительно, с повышением температуры от оптимальных значений начинается увеличение размера зерна, падение твердости и значительный рост электросопротивления, обусловленный легированием твердого раствора карбидо- и нитридообразующими

элементами за счет растворения избыточных фаз. Механические свойства ВАС после закалки на оптимальную температуру характеризуются следующими величинами:  $\sigma_{0,2}=585$  МПа,  $\sigma_B=960$  МПа,  $\delta=50,4\%$ ,  $\Psi=47\%$ .

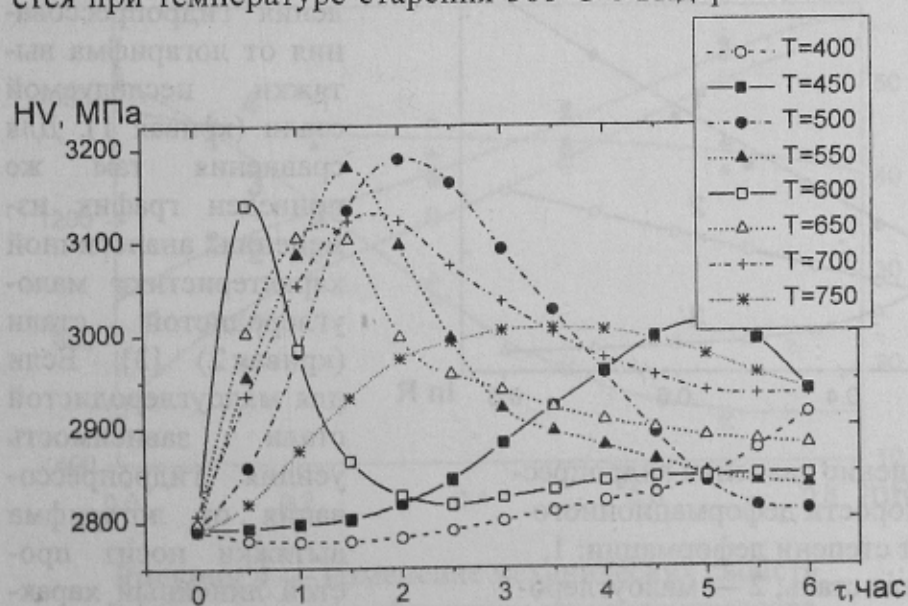
Количественный анализ кривых упрочнения с привлечением модели Людвиговсона [2], описывающей пластическое течение поликристаллов, подтверждает наличие изменений в характере деформационного упрочнения аустенитных сталей с разным содержанием азота. Значения параметров уравнения Людвиговсона  $K_1$ ,  $n_1$ ,  $K_2$ ,  $n_2$ , переходных деформаций  $e_n$  и напряжений  $S_n$ , характеризующих структурное состояние и свойства исследованных сталей, приведены в таблице 1.

Поскольку одним из основных резервов упрочнения аустенитных сталей является дисперсионное твердение, то следующий этап исследований состоял в изучении влияния режимов старения на их структуру и прочностные свойства. Общеизвестно, что увеличение суммарного содержания азота в аустенитных сталях приводит к увеличению эффекта дисперсионного твердения [1]. Однако, для исследуемых сталей не было ясно какие температуры и времена выдержек позволяют получить максимальную твердость при сохранении высокого уровня пластических характеристик. Поэтому исследовалась кинетика старения этих сталей в широком интервале температур (400–750°C) и времен выдержек (до 10 часов). Полученные результаты (рисунок 2) характеризуют закономерности дисперсионного твердения исследованных ВАС и дают возможность целенаправленно получать их высокопрочные состояния.

**Таблица 1** — Параметры уравнения Людвиговсона, значения переходных деформаций и напряжений при одноосном растяжении образцов аустенитных сталей

Содержание азота, вес. %	$K_1$ , МПа	$n_1$	$K_2$ , МПа	$-n_2$	$e_n$	$S_n$ , МПа
0,023	1180	0,356	140	79,3	0,055	420
0,45	2107	0,386	399	16,7	0,22	1164

Как видно из кривых  $HV=f(T, \tau)$  максимальное значение твердости достигается при температуре старения 500°C с выдержкой в течение 2 ч. При более вы-



**Рисунок 2** — Изменение твердости ВАС от режимов старения

соких температурах (600–700°C) для достижения практически такой же твердости требуется меньшее время выдержки (от 30 мин. до 1,5 часов). Это может быть связано с тем, что, как было показано ранее [1], в интервале температур старения 400–500°C вследствие малой скорости диффузии процесс распада пересыщенного твердого раствора идет достаточно медленно (обнаружено гетерогенное зарождение мелкодисперсной фазы разме-

медленно (обнаружено гетерогенное зарождение мелкодисперсной фазы разме-

ром до 0,2 мкм в теле зерна). В интервале 550–750°C образование фазы  $Cr_2N$  идет заметно быстрее и сопровождается коагуляцией частиц до размеров 10–20 мкм. Карбидная фаза  $Cr_{23}C_6$  выделяется преимущественно по границам зерен в интервале 650–750°C.

Силовой режим процесса гидропрессования является интегральной характеристикой, отражающей как влияние условий деформирования (геометрия инструмента, трение в очаге деформации, рабочая жидкость и т.д.), так и особенности деформируемого материала, в частности, его исходное состояние и склонность к деформационному упрочнению. Поэтому определение его параметров имеет важное значение при разработке технологий термомеханической обработки исследуемых сталей.

Учитывая, что силовой режим при гидропрессовании во многом определяется структурным состоянием материала, его твердостью, другими механическими свойствами, на первом этапе проводилась закалка сталей. Задача состояла в оптимизации режима обработки на твердый раствор для получения гомогенной структуры с минимальными выделениями частиц второй фазы. В проведенных экспериментах с использованием методов оптической микроскопии, дюротрии и резистометрии исследовалось структурное состояние закаленных при разных режимах сталей. Анализ полученных результатов позволил определить режимы, обеспечивающие наиболее благоприятное для гидропрессования структурное состояние. Механические свойства сталей после обработки на твердый раствор по оптимальным режимам таковы: временное сопротивление  $\sigma_b=940-1180$  МПа; предел текучести  $\sigma_{0,2}=580-330$  МПа; предел пропорциональности  $\sigma_{пл}=370-530$  МПа; твердость  $HV=2700-3000$  МПа; относительное удлинение  $\delta=45-55\%$ ; относительное сужение  $\psi=45-60\%$ .

P, МПа

$K_1 n_1$ , МПа

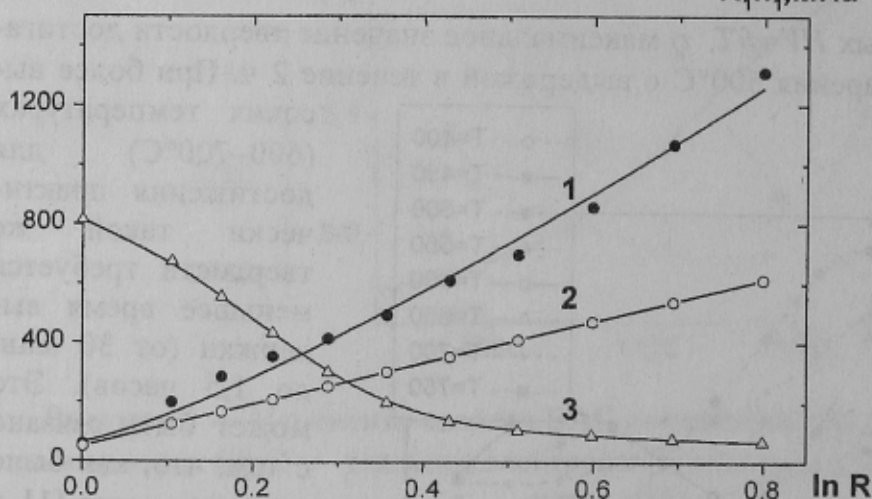


Рисунок 3 — Изменение давления гидропрессования (1, 2) и скорости деформационного упрочнения (3) от степени деформации: 1, 3 — высокоазотистая сталь; 2 — малоуглеродистая сталь

На рисунке 3 приведена зависимость изменения давления гидропрессования от логарифма вытяжки исследуемой стали (кривая 1). Для сравнения там же приведен график изменения аналогичной характеристики малоуглеродистой стали (кривая 2) [3]. Если для малоуглеродистой стали зависимость усилия гидропрессования от логарифма вытяжки носит простой линейный характер, то для ВАС такая же зависимость за-

метно отличается от линейной и может быть аппроксимирована показательной функцией типа  $P=a+b(\ln R)^c$  (в рассмотренном случае  $P=63,8+1573(\ln R)^{1,22}$ ). Откло-

нение от линейности связано с сильным деформационным упрочнением сталей данного класса.

В этой связи на рисунке 3 приведена зависимость  $K_1 \cdot n_1 = f(\ln R)$ , характеризующая скорость деформационного упрочнения  $dS/de$  высокоазотистой стали ( $dS/de = K_1 \cdot n_1$ ) при величине истинной деформации  $e=1$  [2]. Значения  $K_1 \cdot n_1$  с ростом степени деформации уменьшаются, причем более интенсивный спад наблюдается в области деформаций до  $\ln R=0,4$ . Упрочнение стали в процессе деформации, причем с различной скоростью, объясняет нелинейный характер зависимости давления от  $\ln R$ .

Кривая, описывающая силовой режим гидропрессования ВАС показывает, что рост степени деформации вызывает более интенсивный, чем у малоуглеродистой стали рост усилия. Повышение степени деформации свыше 0,7 приводит к возрастанию пикового давления до 1400–1500 МПа, что неблагоприятно сказывается на условиях протекания процесса, может вызвать разрушение детали оснастки и поэтому неприемлемо для применения в производственных условиях. Исходя из графиков на рисунке 3 рациональная область степеней деформации —  $\ln R$  находится в пределах до 0,6.

Изменение структуры ВАС в процессе пластической деформации характерно для материалов с низкими значениями ЭДУ [1]. Дефектная структура формируется в результате скольжения дислокаций по октаэдрическим плоскостям  $\{111\}\gamma$ , а также вследствие образования двойников деформации системы  $\{111\} \langle 112 \rangle \gamma$  и деформационных дефектов упаковки в аустените. При относительно небольших деформациях ( $\ln R \sim 0,1$ ) характер скольжения, в основном, планарный. С повышением уровня деформации ( $\ln R > 0,1$ ) роль планарного скольжения уменьшается, и процесс протекает главным образом за счет мультиплетного скольжения на фоне развития двойникования.

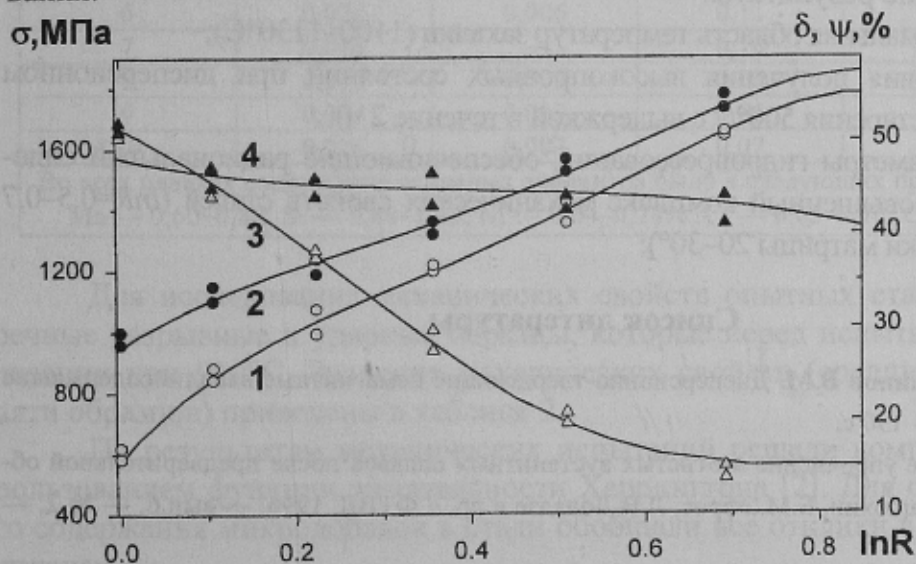


Рисунок 4 — Изменение механических свойств ВАС от степени деформации при гидропрессовании: 1 —  $\sigma_{0,2}$ ; 2 —  $\sigma_B$ ; 3 —  $\delta$ ; 4 —  $\psi$

Влияние параметров гидропрессования на изменение механических свойств ВАС оценивалось по результатам испытаний на одноосное растяжение. Изменение прочностных и пластических характеристик исследуемой стали представлены на рисунке 4.

Пластическая деформация в условиях высоких гидростатических давлений вызывает значительный рост прочностных характе-

ристик. В интервале степеней обжатия до 0,4 происходит интенсивное сближение значений  $\sigma_B$  и  $\sigma_{0,2}$  с одновременным их ростом и падение показателей пластичности. В интервале 0,4–0,6 вследствие снижения скорости деформационного упрочнения, интенсивность этого сближения уменьшается, показатели пластичности  $\delta$  и  $\psi$  снижаются более плавно, оставаясь при этом на достаточно высоком уровне ( $\delta=15-30\%$ ;  $\psi=40-45\%$ ). Дальнейшее увеличение степени деформации с точки зрения практического применения представляется нецелесообразным, поскольку приводит к незначительному дополнительному повышению прочностных свойств.

Изменение механических свойств сталей при гидропрессовании типично для холодной пластической деформации (происходит увеличение прочностных и падение пластических характеристик). Однако образцы, полученные гидропрессованием, благодаря реализации значительных пластических деформаций при высоких гидростатических давлениях, имеют более высокие показатели свойств, чем полученные традиционной многоцикловой обработкой [3]. По сравнению с недеформированной сталью гидропрессование приводит к росту предела прочности в 1,5–1,8 раза, предела текучести в 2–2,5 раза при сохранении на высоком уровне характеристик пластичности.

Наблюдаемые особенности деформационного упрочнения определяют различия в характере пластического течения при одноосном растяжении ВАС по сравнению со сталями другого класса. Это связано с количеством, типом дефектов в  $\gamma$ -матрице, их распределением, а также интенсивностью процессов двойникования на фоне начальных стадий распада пересыщенного ГЦК — твердого раствора при термическом упрочнении и гидропрессовании.

В результате проведенных исследований высокоазотистых аустенитных сталей получены следующие результаты:

- установлена оптимальная область температур закалки (1100–1130°C);
- определены условия получения высокопрочных состояний при дисперсионном твердении (температура старения 500°C с выдержкой в течение 2 ч);
- установлены параметры гидропрессования, обеспечивающие рациональный силовой режим процесса и повышенный комплекс механических свойств сталей ( $\ln R=0,5-0,7$  при угле конусной воронки матрицы 20–30°):

### Список литературы

1. Банных О.А., Блинов В.М. Дисперсионно-твердеющие немагнитные ванадийсодержащие стали — М.: Наука, 1980. — 190 с.
2. Деформационное упрочнение азотистых аустенитных сплавов после предварительной обработки экструзией / В.Н.Варюхин, Б.М.Эфрос, Л.В.Лолодзе и др. // ФТВД, 1996. — вып.6. — № 2. — С. 106.
3. Высокие давления в современных технологиях обработки материалов / Б.И.Береснев, К.И.Езерский, Е.В.Трушин и др. — М.: Наука, 1988. — 245 с.

© Богданов В.А., Пашинская Е.Г., Спусканюк В.З., Эфрос Б.М., 1999.