

ОСОБЕННОСТИ ТЕРМИЧЕСКОЙ ОБРАБОТКИ ПОРОШКОВЫХ СТАЛЕЙ МАРКИ П40ХН С ПОВЫШЕННЫМИ СВОЙСТВАМИ

А.С. Петросян, Л.З. Галстян

Национальный политехнический университет Армении

Изучены особенности термической обработки порошковых сталей марки П40ХН с повышенными свойствами. Показано, что выбор стали для изготовления той или иной детали и метод ее упрочнения определяются, в первую очередь, условиями работы детали, величиной и характером напряжений, возникающих в ней в процессе эксплуатации, размерами и формой детали и т.д.

Кроме необходимого комплекса механических свойств, к конструкционным сталям предъявляются и технологические требования, исходя из которых для получения низколегированных конструкционных сталей выбраны и обоснованы технологии порошковой металлургии. С использованием этой технологии при изготовлении деталей достигаются минимальные потери материала и сокращается трудоемкость.

Разработана технология термической обработки для порошковой стали марки П40ХН, полученной экструзией, которая обеспечивает высокие механические свойства материала, такие как предел прочности, предел текучести, относительное удлинение, ударная вязкость. Исследована микроструктура стали П40ХН и обоснованы режимы термической обработки в виде улучшения, т.е. закалка при температуре 820 °С, охлаждение в машинном масле, затем высокий отпуск при температуре 600 °С с охлаждением также в масле, что образует сорбитную микроструктуру. Высокие механические свойства после улучшения возможны лишь при обеспечении требуемой прокаливаемости и получении мелкого зерна. При этом нельзя допустить развитие отпускной хрупкости. Закалка с высоким отпуском создаёт наилучшее соотношение прочности и вязкости стали, уменьшает чувствительность к концентраторам напряжений.

Указанный комплекс механических свойств и термическая обработка порошковых сталей марки П40ХН обеспечивают заданную работоспособность деталей двигателя внутреннего сгорания, изготовленных методами порошковой металлургии.

Ключевые слова: экструзия, порошковая сталь, закалка, отпуск, улучшение, микроструктура, твердость, прочность, вязкость.

Введение. Из известных в технике материалов лучшее сочетание прочности, надежности и долговечности имеет сталь. Поэтому при изготовлении ответственных изделий, подвергаемых большим нагрузкам, в качестве основного материала применяют сталь. Свойства стали зависят от ее структуры и состава. Совместное воздействие на металлы методов термической обработки, которая изменяет структуру, и легирования - наиболее эффективный способ повышения механических характеристик стали.

Выбор стали для изготовления той или иной детали и метод ее упрочнения определяются, в первую очередь, условиями работы детали, величиной и характером напряжений, возникающих в ней в процессе эксплуатации, размерами и формой детали и т.д.

Кроме необходимого комплекса механических свойств, к конструкционным сталям предъявляются и технологические требования, суть которых в том, чтобы трудоёмкость изготовления деталей из них была минимальной. Для этого сталь должна обладать хорошей обрабатываемостью резанием и давлением, свариваемостью, способностью к литью и т.д. Эти свойства зависят от её химического состава и правильного выбора режимов предварительной термической обработки.

В специальных отраслях машиностроения, где проблема прочности (или удельной прочности) играет решающую роль, выбор стали и последующая технология её термической обработки должны осуществляться только из условия достижения максимальных эксплуатационных свойств.

Постановка задачи и методы исследования. Вначале выясним, какие нагрузки испытывает деталь. Если это напряжения растяжения или сжатия и они более или менее равномерно распределены по сечению, то деталь должна иметь сквозную прокаливаемость. Поэтому с увеличением сечения детали следует применять и более легированные стали. В табл. 1 в качестве примера приведены значения критического диаметра прокаливаемости D_{95} (95% мартенсита) некоторых сталей в зависимости от легирования [1].

Таблица 1

<i>Критический диаметр при закалке некоторых сталей</i>			
№ п/п	Сталь	Критический диаметр D_{95} (мм) при закалке:	
		в воде	в минеральном масле
1	40	10	2
2	40X	30	5
3	40XH	50	35
4	40XHM	100	75

Например, для изготовления детали диаметром 30 мм можно рекомендовать сталь 40X (или другую сталь, имеющую такую же прокаливаемость), закалённую в воде. Если конфигурация детали сложная и охлаждение в воде приводит к значительной деформации, то вместо воды в качестве закалочной среды следует применять минеральное машинное масло, а вместо стали 40X – сталь 40XH. Если же деталь испытывает только изгибающие или крутящие нагрузки, её сердцевина не подвергается воздействию напряжений, поэтому прокаливаемость стали не имеет такого важного значения.

У многих деталей машин (валов, шестерён и т.д.) поверхность в процессе эксплуатации подвергается истиранию, и в то же время на них воздействуют динамические (чаще всего ударные) нагрузки. Для успешной работы в таких условиях поверхность детали должна иметь высокую твёрдость, а сердцевина быть вязкой. Такое сочетание свойств достигается правильным выбором марки стали и последующим упрочнением её поверхностных слоёв. Для изготовления подобных деталей можно применять различные группы сталей и способы их поверхностного упрочнения, например, среднеуглеродистые стали (40, 45, 40X, 45X, 40XH и др.), упрочняемые поверхностной закалкой с последующим низким отпуском.

Механические свойства стали зависят не только от её состава, но и от строения (структуры). Поэтому целью данного исследования является разработка технологии термической обработки порошковых низколегированных конструкционных сталей и получение необходимой структуры, обеспечивающей требуемый комплекс свойств стали.

Среднеуглеродистые конструкционные стали применяют для изготовления деталей машин, к которым предъявляются высокие требования по пределу текучести, пределу выносливости и ударной вязкости. Такой комплекс механических свойств достигается в результате улучшения стали, т.е. закалки с высоким отпуском.

Проведен микроструктурный анализ для порошковой стали П40ХН. Термическая обработка осуществлена после экструзии в 10%-ом растворе NaCl. Приведены микроструктуры без термообработки (рис.1а), где явно выражены микроструктуры феррита и мелкопластинчатого перлита ($\times 400$), а также микроструктура порошковой стали П40ХН после окончательной термической обработки. Это закалка при $860\text{ }^{\circ}\text{C}$ в масле (рис.1б), а также закалка с последующим отпуском при $600\text{ }^{\circ}\text{C}$ с выдержкой 1ч, что образует сорбитную микроструктуру (рис. 1в).

Структура стали после улучшения представляет собой сорбит отпуска. Закалка с высоким отпуском создаёт наилучшее соотношение прочности и вязкости стали, уменьшает чувствительность к концентраторам напряжений, увеличивает развитие трещины и снижает температуру верхнего и нижнего порогов хладноломкости. Высокие механические свойства после улучшения возможны лишь при обеспечении требуемой прокаливаемости, поэтому прокаливаемость служит важнейшей характеристикой при выборе этих сталей. Кроме прокаливаемости, в таких сталях важно получить мелкое зерно (не менее 5 баллов) и не допустить развития отпускной хрупкости.

Проведен сравнительный анализ имеющихся сталей: 40 и П40ХН. Их химический состав в соответствии с ГОСТ представлен в табл.2.

У стали 40 после нормализации, т.е. в состоянии поставки, $\sigma_b \approx 610\text{ МПа}$, $\sigma_{0,2} \approx 360\text{ МПа}$ [2].

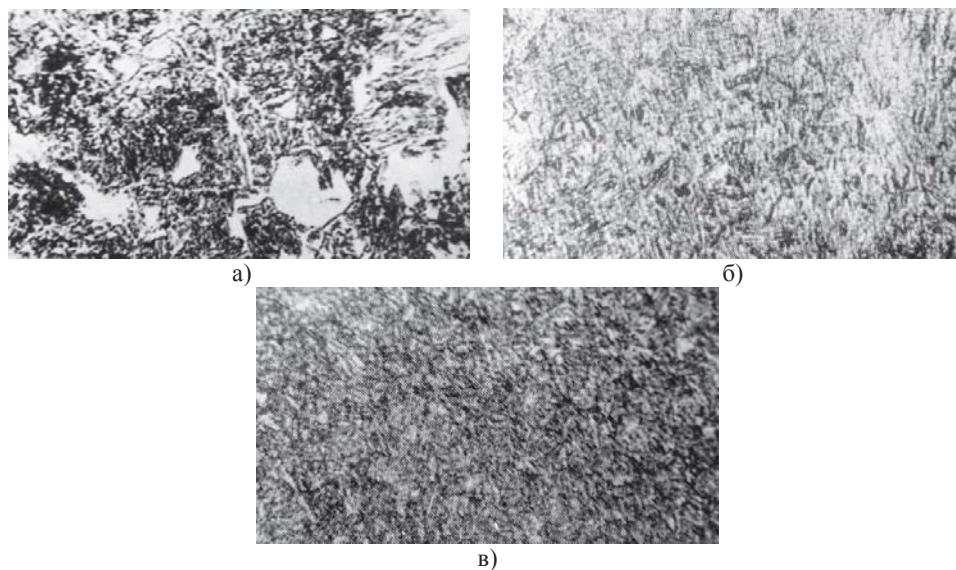


Рис. 1. Микроструктура порошковой стали марки П40ХН, полученной экструзией:
 а - без термообработки (феррит и мелкопластинчатый перлит, $\times 400$),
 б - термическая обработка: закалка при 860 °С в масле (мартенсит, $\times 400$),
 в - термическая обработка: закалка при 860 °С в масле и отпуск при 600 °С,
 выдержка 1ч (сорбит, $\times 400$)

Таблица 2

№ п/п	Марка стали	Химический состав некоторых сталей						
		Содержание элементов, вес. %						
		C	Mn	Si	S	P	Cr	Ni
1	40	0,42...0,50	0,5...0,8	0,17...0,37	не более 0,035	не более 0,035	-	-
2	П40ХН	0,36...0,44	0,5...0,8	0,17...0,37	не более 0,035	не более 0,035	0,45...0,75	1,0...1,4

Сталь П40ХН, полученная методом порошковой металлургии экструзией [3], после отжига имеет твердость не более $HV=1970 \text{ МПа}$, $\sigma_b \approx 562,85 \text{ МПа}$, а $\sigma_{0,2} < 350 \text{ МПа}$, т.к. отношение $\sigma_{0,2}/\sigma_b$ для отожжённой легированной стали не превышает 0,5...0,6 [4, 5]. Таким образом, ни одна из этих сталей в состоянии поставки не имеет $\sigma_{0,2} \geq 750 \text{ МПа}$, поэтому для получения требуемых свойств необходимо провести улучшение, т.е. закалку с высоким отпуском. Для получения однородных свойств по всему сечению детали улучшенные стали должны обладать полной, т.е. сквозной прокаливаемостью. Сталь 40 имеет критический диаметр при закалке в воде $D_{90} = 10 \text{ мм}$, $D_{50} = 15 \text{ мм}$ (90% и 50%

мартенсита в центре детали соответственно), а сталь П40ХН: $D_{90} = 17 \text{ мм}$, $D_{50} = 30 \text{ мм}$ даже при охлаждении в масле.

Таким образом, углеродистая сталь 40 не имеет требуемых свойств по всему сечению детали толщиной 20 мм, поэтому данную деталь необходимо изготовить из стали П40ХН.

Результаты исследования. Критические точки для термической обработки стали 40ХН, полученной методом литья: $A_{c1} = 710 \text{ }^\circ\text{C}$, $A_{c3} = 760 \text{ }^\circ\text{C}$, $M_n = 340 \text{ }^\circ\text{C}$ [6]. При нагреве хром и никель растворяются в феррите, а после термообработки упрочняют его и повышают вязкость феррита. Важное значение имеет влияние легирующих элементов на порог хладноломкости. Наличие хрома в стали способствует некоторому повышению порога хладноломкости, тогда как никель его интенсивно снижает (при содержании в стали 1% никеля порог хладноломкости снижается на 60...80 $^\circ\text{C}$), уменьшая тем самым склонность стали к хрупкому разрушению. Поэтому никель является наиболее ценным легирующим элементом.

Основная цель легирования конструкционной стали – повышение её прокаливаемости. Оба элемента снижают критическую скорость закалки и увеличивают прокаливаемость стали.

Таким образом, хромоникелевые стали обладают достаточно высокой прокаливаемостью, хорошей прочностью и вязкостью. Поэтому их применяют для изготовления крупных деталей сложной конфигурации, работающих при динамических нагрузках.

На рис. 2 приведена диаграмма распада переохлаждённого аустенита стандартной стали 40ХН в изотермических условиях [7], а на рис. 3 - влияние температуры отпуска на механические свойства порошковой стали марки П40ХН.

Сталь П40ХН является доэвтектоидной конструкционной легированной сталью. Температура нагрева при закалке выбирается в этом случае на 50 ... 70 $^\circ\text{C}$ выше критической точки A_{c3} , т.е.

$$t_n = A_{c3} + (50 \dots 70) \text{ }^\circ\text{C} = 760 \text{ }^\circ\text{C} + 60 \text{ }^\circ\text{C} = 820 \text{ }^\circ\text{C}.$$

Для получения мартенситной структуры при закалке стали её необходимо охлаждать со скоростью не меньшей, чем критическая скорость закалки ($V_{\text{охл}} \geq V_{\text{кр}}$). Пользуясь диаграммой изотермического превращения переохлаждённого аустенита, определяем значение $V_{\text{кр}}$ (рис.2):

$$V_{\text{кр}} = \frac{A - t_{\text{мин}}}{1,5 \cdot \tau_{\text{мин}}} = \frac{710 - 550}{1,5 \cdot 1,5} = 70 \text{ } \%. .$$

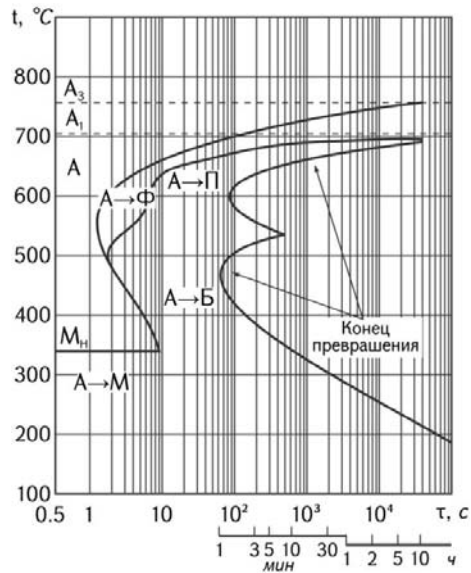


Рис. 2. Диаграмма изотермического превращения переохлажденного аустенита стали 40ХН (температура аустенитизации 820 °С) [7]

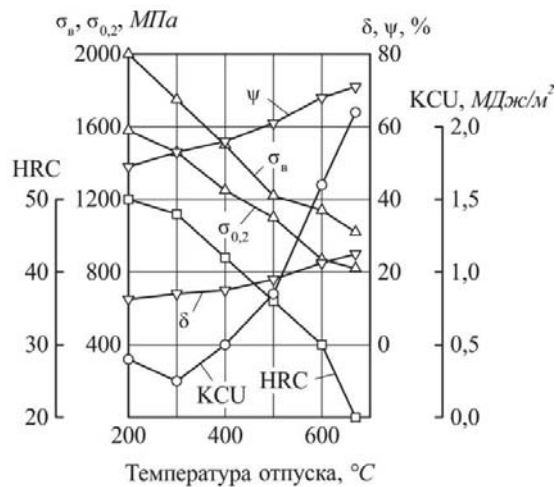


Рис. 3. Механические свойства стали П40ХН в зависимости от температуры отпуска (закалка при 820 °С в масле)

В качестве закалочной среды следует применять машинное масло (минеральное), в котором скорость охлаждения в интервале температур наименьшей устойчивости переохлажденного аустенита (650...550°С)

составляет примерно 150 ‰, что больше $V_{кр}$ данной стали. После закалки структура стали состоит из мартенсита и ~ 3...5 % остаточного аустенита.

Для получения требуемых механических свойств и уменьшения внутренних напряжений, возникаемых при закалке, сталь подвергают отпуску. С повышением температуры отпуска прочностные свойства конструкционной стали уменьшаются, а её пластичность и вязкость возрастают.

Для получения значений $\sigma_{0,2} \geq 750 \text{ МПа}$ и $KCU \geq 0,6 \text{ МДж/м}^2$ температура отпуска стали П40ХН должна быть 600 °С (рис.3). Учитывая, что хромоникелевые стали склонны к обратимой отпускной хрупкости, охлаждение деталей из стали П40ХН до комнатной температуры при отпуске следует проводить в масле.

Заключение. Таким образом, окончательным процессом термической обработки стали П40ХН является улучшение, т.е. закалка при температуре 820 °С, охлаждение в машинном масле, затем высокий отпуск при температуре 600 °С с охлаждением также в масле. После такой термической обработки структура стали по всему сечению детали представляет собой сорбит отпуска, а механические свойства для порошковой стали следующие:

- предел прочности – 960 МПа;
- предел текучести – 750 МПа;
- относительное удлинение – 20%;
- относительное сужение – 60%;
- ударная вязкость – 1,5...2,5 МДж/м².

Указанный комплекс механических свойств обеспечит заданную работоспособность деталей двигателя внутреннего сгорания, изготовленных методами порошковой металлургии.

Литература

1. **Качанов Н.Н.** Прокаливаемость стали.– 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1978. – 192 с.
2. **Журавлев В.Н., Николаева О.И.** Машиностроительные стали: Справочник.– 4-е изд., перераб. и доп.– М.: Машиностроение, 1992. – 480 с.
3. **Петросян А.С., Галстян Л.З.** Технологические особенности получения феррохромовых порошковых композиционных материалов методом экструзии // Известия НАН РА и НПУА. Серия Техн. науки.- 2017.- Т. 70, № 1. – С. 30 – 38.
4. **Ушаков В.Г., Филагов В.И., Ибрагимович Х.М.** Выбор марки стали и режима термической обработки деталей машин. - Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2001.-23с.
5. **Геллер Ю.А., Рахштадт А.Г.** Материаловедение: Учебное пособие для высш. учеб. завед. – 6-е изд., перераб. и доп. – М.: Металлургия, 1989. – 456 с.
6. Термическая обработка в машиностроении: Справочник / Под ред. **Ю.М. Лахтина и А.Г. Рахштадта.** – М.: Машиностроение, 1980. – 784 с.

7. **Попов А.А., Попова Л.Е.** Изотермические и термокинетические диаграммы распада переохлажденного аустенита: Справочник термиста.- 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Металлургия, 1965.- 496 с.

*Поступила в редакцию 16.06.2017.
Принята к опубликованию 10.11.2017.*

ՄԱԿՆԻՉԻ ԲԱՐՁՐ ՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐՈՎ ՓՈՇԵՊՈՂՊԱՏԻ ՋԵՐՄԱՅԻՆ ՄՇԱԿՄԱՆ ԱՌԱՆՁՆԱՀԱՏԿՈՒԹՅՈՒՆՆԵՐԸ

Հ.Ս. Պետրոսյան, Լ.Ջ. Գալստյան

Հետազոտվել են Մ40XH մակնիշի բարձր հատկություններով փոշեպողպատի ջերմային մշակման առանձնահատկությունները: Ապացուցվել է, որ այս կամ այն մեքենամասի նյութի ընտրության և նրա ամրացման համար առաջին հերթին որոշում են մեքենամասի աշխատանքային պայմանները և շահագործման ժամանակ նրանում ծագող լարումների արժեքներն ու բնույթը, նրա ձևը, չափերը և այլն:

Բացի անհրաժեշտ համալիր մեխանիկական հատկություններից, կոնստրուկցիոն պողպատներին ներկայացվում են նաև տեխնոլոգիական պահանջներ, որոնցից ելնելով՝ ցածր լեգիրված կոնստրուկցիոն պողպատների ստացման համար ընդունվել և հիմնավորվել են փոշեմետալուրգիական տեխնոլոգիաները, համաձայն որոնց ապահովվում են նյութի նվազագույն կորուստը և աշխատատարություն:

Մշակվել է ջերմային մշակման տեխնոլոգիա տաք արտամղմամբ ստացված Մ40XH մակնիշի փոշեպողպատի համար, որն ապահովում է նյութի բարձր մեխանիկական հատկությունները՝ ամրության սահման, հոսունության սահման, հարաբերական երկարացում, հարվածային մածուցիկություն: Հետազոտվել է Մ40XH փոշեպողպատի միկրոկառուցվածքը, և հիմնավորվել են ջերմային մշակման ռեժիմները՝ լավացում, այսինքն՝ միում 820 °C ջերմաստիճանից, սառեցում մեքենայական յուղի մեջ, որին հետևում է բարձր ջերմաստիճանային արձակումը՝ 600 °C, յուղում կրկին սառեցումով, ինչը ձևավորում է սորբիտային կառուցվածք: Լավացումից հետո մեխանիկական բարձր հատկությունների ստացումը հնարավոր է պահանջվող լիամխելիության ու մանրահատ կառուցվածքի ապահովման դեպքում, ինչպես նաև պետք է բացառել արձակման փխրունության զարգացումը: Բարձր արձակումով միումը ստեղծում է պողպատի ամրության և մածուցիկության լավագույն հարաբերակցության պայմաններ, իջեցնում է զգայնությունը լարումների կոնցենտրատորների նկատմամբ:

Մ40XH մակնիշի փոշեպողպատի ջերմային մշակումը և բացահայտված համալիր հատկություններն ապահովվում են ներքին այրման շարժիչի փոշեմետալուրգիայի մեթոդներով պատրաստված մեքենամասերի պահանջված աշխատունակությունը:

Առանցքային բաղադր. տաք արտամղում, փոշեպողպատ, միում, արձակում, լավացում, միկրոկառուցվածք, կարծրություն, ամրություն, մածուցիկություն:

PECULIARITIES OF HEAT TREATMENT OF THE П40XH - GRADE POWDER STEELS WITH IMPROVED PROPERTIES

H.S. Petrosyan, L.Z. Galstyan

The peculiarities of heat treatment of the П40XH - grade powder steels with improved properties are studied. It is shown that the selection of steel for making this or that part, and the method for its strengthening are, first of all, determined by the operation conditions of the part, the value and nature of stresses, occurring in it in the maintenance process, by the dimensions and form of the parts, etc.

Besides the required complex of mechanical properties, technological requirements are also set to the structural steels, based on which, to obtain low-alloyed structural steels, technologies of powder metallurgy are selected and substantiated. By using that technology at making parts, minimal losses of material are achieved, and the labor intensity reduces.

A technology of heat treatment for the П40XH - grade powder steel obtained by extrusion is developed, ensuring high mechanical properties of the material, such as the hardness limit, elongation, impact strength. The structure of the П40XH steel is investigated, and the conditions of heat treatment are substantiated in the form of improvement, i.e. hardening at temperature of 820 °C, quenching in machine oil, then high tempering at temperature of 600 °C, again quenching in oil which forms a sorbite microstructure after improvement. The high mechanical properties are possible only at ensuring the required hardenability and obtaining small grains. At the same time, the temper brittleness is impermissible. Hardening with high tempering creates the best ratio of strength and viscosity of the steel, and reduces the sensitivity to the stress concentrators.

The mentioned complex of mechanical properties and the heat treatment of the П40XH - grade powder steels ensure the assigned operating capacity of the internal combustion engine parts made by the methods of powder metallurgy.

Keywords: extrusion, powder steel, hardening, tempering, improvement, microstructure, strength, hardness, viscosity.