

Жолдошов Б.М.

ОСОБЕННОСТИ ОХЛАЖДЕНИЯ И РАСПАДА АУСТЕНИТА ДЛЯ БЫСТРОРЕЖУЩЕЙ СТАЛИ Р6М5

B.M. Zholdoshev

FEATURES COOLING AND AUSTENITE DECOMPOSITION FOR HSS R6M5

УДК: 621.785.36: 669.14.018.252

В данной работе рассмотрены особенности охлаждения и распада аустенита для быстрорежущей стали Р6М5. На основе табличных данных построены уравнения регрессий, позволяющие вычислить температуры отдельных слоев в заданные моменты времени.

Ключевые слова: аустенит, распад, форсированное охлаждение, легирование, отжиг.

In this paper some features of cooling and decomposition of austenite for high-speed steel R6M5 (P6M5) are considered. On the basis of tabular data there was constructed a regression equation for calculating the temperature of individual layers in a given time/

Key words: austenite, decomposition, forced cooling, transforming, alloying, annealing.

В исследовании [1] изучено и определено возможности значительного сокращения длительности отжига быстрорежущей стали и рекомендовано использовать многократные циклы нагрева и охлаждения вблизи точки A_1 , а в научной работе [2] изучено влияние режимов отжига на структуру и свойства быстрорежущих сталей.

Исходя из вышеуказанных экспериментальных данных, на практике при проведении отжига 2 рода высоколегированных сталей следует отдать предпочтение изотермическому распаду аустенита с последующим охлаждением на воздухе вместо рекомендуемой технологии охлаждения со скоростью ~ 20 К/ч, в зоне минимальной устойчивости аустенита. Показано что, скорость распада аустенита при изотермической выдержке существенно больше, чем при непрерывном охлаждении.

Например, при изотермической выдержке при 730°C стали 4Х5Ш5С, предварительно нагретой до 1030°C , аустенит полностью распадается через 45 мин. При непрерывном охлаждении минимальная длительность, необходимая для распада, составляет 7 часов, что на порядок выше, чем при изотермической выдержке. Это требует регламентированной скорости охлаждения ~ 40 К/ч. При большей скорости распад завершится, при меньшей – получаются более грубые фазы.

Покажем целесообразность проведения форсированного отжига легированных сталей по режиму: посадка в нагретую до $850 - 880^\circ\text{C}$ печь и изотермическая выдержка в течение $0,5 - 1$ ч после выравнивания температуры по сечению \rightarrow форсированное охлаждение на воздухе или в масле до температур $M_n + (150 - 200)^\circ\text{C}$ на глубину $1/6 - 1/10$ толщины заготовки \rightarrow посадка в другую печь с температурой $680 - 720^\circ\text{C}$ (близкой к температуре минимальной устойчивости аустенита), и выдержка

при этой температуре в течение времени, необходимого для завершения превращения аустенита в перлит \rightarrow выгрузка на воздух (либо охлаждение в масле).

Предложенный режим позволяет, во-первых, существенно (в 2-3 раза) повысить производительность печей, а во-вторых, резко сократить потери тепла.

Остановимся на особенностях форсированного охлаждения и распада аустенита легированных сталей. В большинстве случаев при пересадке деталей в печь для изотермической выдержки при $680 - 720^\circ\text{C}$ центральные слои сохраняют более высокую температуру, чем поверхностные. Поэтому после пересадки деталей происходит повторный перегрев поверхностных слоев выше температуры печи и задержка превращения $A \rightarrow P$. Поэтому охлаждение деталей должно осуществляться с высокими скоростями так, чтобы к моменту их пересадки приповерхностные зоны на глубине $\sim (1/6 - 1/10)L_0$, где (L_0 - толщина детали) достигали температур $M_n + (150-200)^\circ\text{C}$ в то время, как средняя температура детали сохранялась бы на уровне 700°C . Это, во-первых, ускорит начало превращения $A \rightarrow P$ и повысит скорость отжига, что связывается с увеличением числа центров распада при переохлаждении аустенита и облегчением отвода теплоты $A \rightarrow P$ – превращения с границ растущей фазы.

По нашему мнению, градиентное охлаждение дополнительно способствует распаду аустенита за счет наведения поля растягивающих напряжений в поверхностных слоях на начальных этапах охлаждения, а затем и в глубинных после выравнивания температуры.

Кроме того, в прилагаемой схеме охлаждения сведутся к минимуму тепловые потери, которые характерны для известных режимов обработки с предварительным подстуживанием всей массы металла в область ниже температуры минимальной устойчивости аустенита.

Для оценки особенностей влияния параметров предварительного охлаждения на скорость перлитного распада аустенита в процессе изотермической выдержки ниже A_1 были выполнены специальные эксперименты на стали Р6М5, в которых перед выдержкой варьировались (согласно рис.1):

- температура аустенизации $T_1 = 830, 870, 1100, 1200^\circ\text{C}$, $\tau_1 = 7$ мин;

- температура выдержки при $T_2 = 830$ и 870°C , $\tau_2 = 30$ мин, после высокотемпературного нагрева, до 1200°C ;

- температура кратковременного переохлаждения аустенита составляет $T_3 = 400$ и 550°C , в течении $\tau = 5 - 10$ мин.

Анализ полученных данных показывает следующее:

Устойчивость аустенита при изотермической выдержке существенно зависит от температуры предварительной аустенизации T_1 , причем эта зависимость немонотонная: минимальной устойчивостью обладает аустенит, полученный при $T_1 = 870^\circ\text{C}$, а максимальной – при $T_1 = 1200^\circ\text{C}$.

Переохлаждение аустенита, полученного при $T_1 = 1200^\circ\text{C}$, в область температур $T_3 = 400$ и 550°C приводит к ускорению его распада при $T = 720^\circ\text{C}$, что согласуется с данными для конструкционных сталей. Однако и здесь, видимо, существует некоторая оптимальная температура переохлаждения аустенита (так, охлаждение до $T_3 = 550^\circ\text{C}$ несколько эффективнее, чем до $T_3 = 400^\circ\text{C}$).

Температурная остановка при $T_2 = 830$ и 870°C резко снижает устойчивость аустенита ниже A_1 , вне зависимости от характера последующего охлаждения, однако скорость превращения $A \rightarrow K + П$ и в этом случае выше у переохлажденного до $T_3 = 550^\circ\text{C}$ аустенита. Превращение $A \rightarrow K + П$ при обработке по вариантам 1, 2, 9, 10 (см. рис.1.) идет не только по границам, но и в объеме зерна, причем центрами зарождения феррита являются границы карбидов.

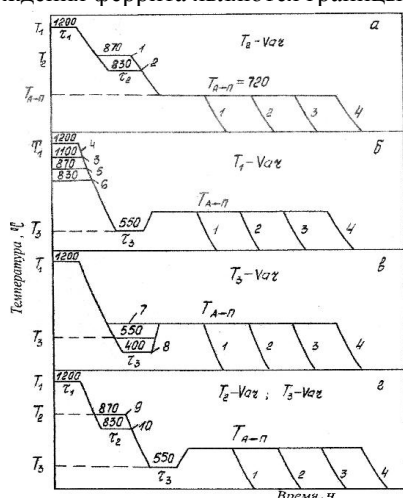


Рис. 1. Варианты предварительной обработки стали Р6М5 перед изотермическим превращением аустенита при $T_{A \rightarrow П} = 720^\circ\text{C}$:

а – изотермическая выдержка аустенита при $T_2 = 830$ и 870°C ;

б – варьировалась начальная температура + переохлаждение до T_3 ;

в – варьировалась начальная температура переохлаждения; г – выдержка при T_2 и T_3 .

Из вышеизложенного вытекает, что в случае проведения отжига непосредственно с температур конца литья или пластической деформации целесообразно осуществлять по схеме 9, 10 (см. рис. 1), которая включает выдержку при $T_2 = 830 - 870^\circ\text{C}$, последующее градиентное охлаждение до T_3 и изотермическую выдержку.

В большинстве случаев отжиг осуществляется с нагревом до $T_1 = 850 - 870^\circ\text{C}$, поэтому остается лишь проведение переохлаждения стали до T_3 . При практической реализации отжига необходимо отметить, что скорость охлаждения деталей при переносе из одной печи в другую должна быть по возможности более высокой, чтобы достичь большей степени переохлаждения поверхности по сравнению с центральными слоями и больших напряжений. В противном случае будет иметь место сравнительно однородное (безградиентное) охлаждение деталей.

График зависимостей твердости от времени распада аустенита согласно вариантов обработки 1-10 (см.рис.1), приведен на рис.2. Как видно из графика зависимостей (см.рис.2), режим 7 обычный изотермический отжиг, свидетельствует, что скорость распада аустенита мала, и процесс распада завершается через 7-10 часов. Режим 5,6 характеризуется невысокой температурой нагрева аустенита перед отжигом, и поэтому аустенит неоднородный, а также недостаточно растворены вторичные фазы в аустените, и поэтому распад аустенита идет легко на готовых центрах. Недостаток этих режимов – не позволяют получить необходимой однородности аустенита по всему объему. Для достижения такой однородности быстрорежущая сталь Р6М5 предварительно нагревалась до $T = 1200^\circ\text{C}$, затем подстуживалась до $T = 870$ и 830°C (режим 1,2). Их анализ показывает, что распад аустенита идет существенно медленнее, чем по режимам 5,6. Задержки при температурах $870-830^\circ\text{C}$ способствуют некоторому перераспределению элементов. Однако число центров распада существенно меньше по сравнению режимами 5,6. Вместе с тем, совместная реализация выдержки при $T = 870-830^\circ\text{C}$ с последующим переохлаждением до $T = 550^\circ\text{C}$, (режимы 9,10) приводит к значительному увеличению скорости превращения $A \rightarrow П$. Устранение выдержки при $T = 870$ и 830°C , и применение большего переохлаждения аустенита до $T = 400^\circ\text{C}$ (режим 8), приводит к существенному ускорению распада аустенита по сравнению с режимами (3,4,7) и практически совпадает с режимами 9,10.

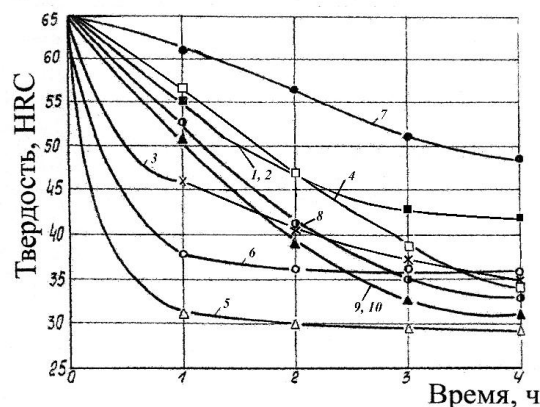


Рис. 2. Зависимость твердости от времени распада аустенита согласно обработке по вариантам 1-10.

В таблице представлены результаты расчета температуры отдельных слоев деталей различной толщины L (м) в средах с температурой V (°C) при варьировании коэффициента теплообмена H (Вт/м²·К). Расчетные варианты взяты в соответствии с нелинейным центральным композиционным планом второго порядка. Здесь 250, 500, 900 и 1200 с – расчетные моменты времени; $n = 5, 10$ и 15 – номера слоев, отсчитываемые от поверхности (всего 20 слоев на полутолщине). Из представленных данных видно, что в зависимости от выбранных параметров L, V и H можно получить различные градиенты и скорости охлаждения. Так для $L = 0,12$ м, $V = 285$ °C и $H = 650$ Вт/м²·К градиент составляет ~ 150 °C, в то время как для $L=0,02$ м он не превышает 3–5°C. На основе табличных данных построены уравнения регрессий, позволяющие вычислить температуры отдельных слоев в заданные моменты времени τ . Так, например, для слоя $n = 15$ получено:

$$T_{15} (\tau = 250 \text{ с}) = 544 + 6154L + 0,28V - 0,57H - 3,6 \cdot 10^{-4}L^2 - 6,7 \cdot 10^{-6}V^2 + 1,8 \cdot 10^{-4}H^2 - 5,8LV + 2,7LH + 3,2 \cdot 10^{-4}VH, \text{ °C}$$

$$T_{15} (\tau = 500 \text{ с}) = 389 + 4068L + 0,36V - 0,53H - 6458L^2 \cdot 10^{-4}V^2 + 3,3 \cdot 10^{-4}H^2 - 5,6LV - 5,95 \cdot 10^{-2}LH + 3,2 \cdot 10^{-4}VH, \text{ °C}$$

$$T_{15} (\tau = 900 \text{ с}) = 267 + 2495L + 0,35V + 0,42H + 1,2 \cdot 10^4L^2 - 1,6 \cdot 10^{-4}V^2 + 4,7 \cdot 10^{-4}H^2 - 3,8LV - 2,99LH + 2,2 \cdot 10^{-4}VH, \text{ °C}$$

Вышеуказанные и приведенные уравнения позволяют рассчитать температуру выбранного на заданной глубине слоя в фиксированный момент τ , если заданы температура окружающей среды V и коэффициент теплообмена.

Необходимо отметить, что режим отжига, описанный выше, был внедрен на кузнечном и ремонтно-инструментальном цехах КамАЗа, а также в металлургическом производстве По АвтоВАЗа. Приоритет разработки подтвержден А.с. № 1381172 [3].

Выводы:

– для форсирования распада аустенита при отжиге и минимизации энергетических затрат при смягчающей обработке.

– приведенные в статье материалы свидетельствуют об эффективности использования избыточной свободной энергии, получаемой при форсированном охлаждении с повышенных температур промежуточных операций (литья и пластической деформации).

Результаты расчета температуры отдельных слоев деталей при охлаждении

№ п/п	L, м	V, °C	H, Вт/м ² К	250 с			500 с			900 с			1200 с		
				n = 5	n = 10	n=15	n = 5	n = 10	n=15	n = 5	n = 10	n=15	n = 5	n = 10	n=15
1	0,04	115	300	514	533	545	319	328	334	179	181	183	141	142	142
2	0,1	115	300	672	741	789	564	617	654	427	462	485	349	375	392
3	0,04	455	300	683	695	703	577	583	586	498	500	501	474	475	476
4	0,1	455	300	770	811	838	710	742	764	635	657	672	593	609	620
5	0,04	115	1000	254	271	281	139	141	143	125	125	125	120	120	120
6	0,1	115	1000	482	591	669	345	409	454	215	242	261	167	180	190
7	0,04	455	1000	541	552	559	473	475	477	465	465	465	465	465	465
8	0,1	455	1000	664	730	776	590	630	659	520	538	551	491	502	509
9	0,12	285	650	642	736	800	553	623	673	454	496	525	402	431	450
10	0,02	285	650	332	334	335	295	295	295	290	290	290	288	288	288
11	0,07	570	650	728	755	774	660	675	685	605	611	615	587	590	592
12	0,07	20	650	436	500	544	240	272	293	91	101	107	49	53	55
13	0,07	285	1300	487	539	575	368	388	401	303	307	310	291	292	293
14	0,07	285	50	850	860	867	814	823	829	761	769	774	724	731	736
15	0,07	285	650	577	625	658	446	471	487	343	352	357	311	315	318

Литература:

1. Жолдошов Б.М., Муратов В.С., Морозова Е.А. Энергоэкономный отжиг поковок из быстрорежущих сталей / Международный журнал экспериментального образования. 2010, №9, -с.86-87.
2. Жолдошов Б.М., Муратов В.С., Кенис М.С. Особенности форсированного охлаждения на распад аустенита в легированных сталях, «Заготовительные производства в машиностроении», №7, 2010. -с.45-47, РФ..
3. А.с. 1381172 (СССР). Способ обработки стальных заготовок/ М.С. Кенис, Б.Ф. Трахтенберг, Т.М. Пугачева и др. Оpubл. 1988. Бюл. № 10.

Рецензент: д.т.н., профессор Носов Н.В.