

АНАЛИЗ ТЕРМОУПРУГИХ НАПРЯЖЕНИЙ В ПОКОВКАХ С УЧЕТОМ ЭФФЕКТА РЕЛАКСАЦИИ

Д.А. Мирзаев, А.Д. Шабуров, А.О. Чернявский

Поскольку напряжения являются одним из основных факторов образования флокенов, важно понимать характер напряженного состояния непрерывно охлаждающейся цилиндрической поковки. Для этого был выполнен компьютерный расчет распределения внутренних напряжений, а также учтена возможность релаксации упругой деформации при охлаждении поковки. Расчет был произведен по нескольким вариантам при различных скоростях охлаждения для трех компонент напряжений – осевой, радиальной и тангенциальной. Расчет эффекта релаксации произведен на основании обработки и аппроксимации экспериментальных данных по ползучести стали марки 40ХГМ в температурном интервале охлаждения после противоблоксной термической обработки. Результаты расчета показали, что если при аналитическом расчете без учета релаксации абсолютная величина напряжений уменьшается и стремится к нулю при подходе к комнатной температуре, то расчет с учетом релаксации внутренних напряжений показывает, что после окончания охлаждения в поковке сохраняются остаточные напряжения, причем на поверхности они сжимающие, а в центре поковки растягивающие. Также было показано влияние данных напряжений на раскрытие зародыша флокена.

На втором этапе было проанализировано влияние внутренних напряжений на диффузию водорода и образование флокенов. Влияние внешних напряжений на диффузию обычно сводят к уменьшению энергии активации диффузии на дополнительную величину. Расчет показал, что влияние данной величины на коэффициент диффузии пренебрежимо мало.

Результаты данной статьи могут быть полезны специалистам, занимающимся проблемами образования флокенов в стали, а также специалистам по компьютерному моделированию технологических процессов в металлургии.

Ключевые слова: охлаждение на воздухе, внутренние напряжения, релаксация напряжений, ползучесть, расчет напряжений, моделирование охлаждения, поковки, флокенообразование, флокены, сталь 40ХГМ.

Введение

Появление флокенов, т. е. заполненных водородом трещин, при охлаждении поволоков обусловлено выделением водорода в микротрещины вследствие уменьшения растворимости водорода в α -железе и их роста из-за непрерывного возрастания давления газа молизирующегося водорода H_2 [1]. Заметное влияние на рост флокенов оказывают термические напряжения [2]. Температурный интервал образования флокенов составляет 200...20 °С. Поэтому анализ напряжений необходим, прежде всего, для низкотемпературной области на заключительной стадии охлаждения поволоков.

В работе [3] был выполнен аналитический расчет напряжений в охлаждаемых поволоках, основанный на известных уравнениях термоупругости [4]. Прежде всего, он подтвердил, что «амплитудные» величины напряжений σ_z , σ_r и σ_θ зависят от разности температур между поверхностью и осью цилиндра.

Максимальные значения растягивающих напряжений σ_z и σ_θ наблюдаются у поверхности, тогда как сжимающих – в центре. Таким образом, при движении вдоль радиуса они изменяют свой знак. Напряжение σ_r только сжимающее. У поверхности оно равно нулю, а максимум модуля наблюдается у оси.

По мере возрастания длительности охлаждения разность температур между центром и поверхностью цилиндра уменьшается, соответ-

ственно, снижаются величины всех напряжений, а при достижении осевой зоной комнатной температуры упругие напряжения должны исчезнуть. Именно в этом заключается основной недостаток предыдущих расчетов, поскольку имеются данные [5] о сохранении в поволоках остаточных напряжений. Этот эффект связан с явлением релаксации на различном расстоянии от оси. В данной статье обсуждаются результаты расчета термических напряжений с учетом их релаксации в охлаждаемых поволоках их стали 40ХГМ, поставляемой ОАО «Уральская кузница» на экспорт, а потому технологические аспекты её тщательно изучаются.

Методика расчета и обсуждение результатов

В основе использованного метода анализа лежат следующие соображения [6, 7]. Допустим, что образец с исходной длиной l_0 был упруго растянут так, что его удлинение составило Δl_0 , а затем заново. Упругие напряжения в таком образце будут

равны $\sigma_0 = E \frac{\Delta l_0}{l_0} = E \varepsilon_0$, однако в ходе выдержки

длительностью τ при повышенной температуре воздействие напряжения приводит к ползучести, создающей пластическую деформацию $\varepsilon_{п}$, что уменьшит упругую деформацию и напряжение,

так как теперь $\varepsilon_0 = \frac{\sigma}{E} + \varepsilon_{п}$ или $\frac{1}{E} \frac{\partial \sigma(\tau, T)}{\partial \tau} = -\dot{\varepsilon}_{п}$.

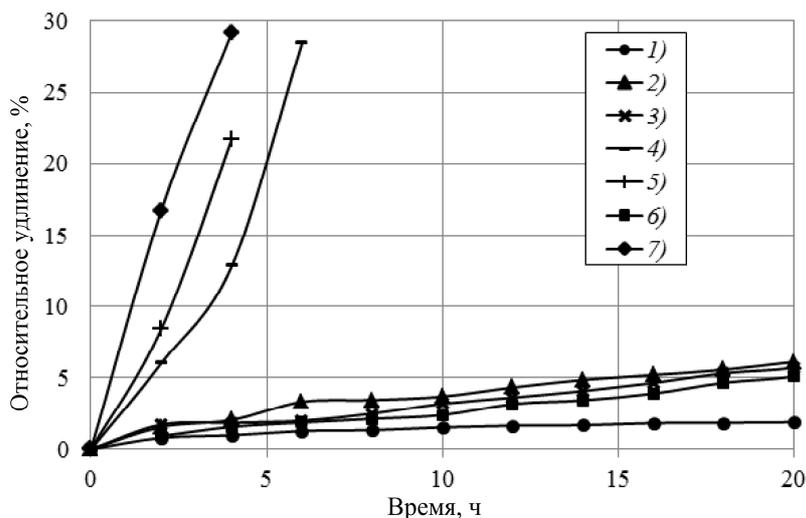


Рис. 1. Кривые ползучести стали марки 40ХГМ при различных параметрах испытания (температура-нагрузка): 1 – 560 °С, 150 МПа; 2 – 560 °С, 220 МПа; 3 – 600 °С, 150 МПа; 4 – 600 °С, 190 МПа; 5 – 600 °С, 230 МПа; 6 – 650 °С, 90 МПа; 7 – 650 °С, 150 МПа

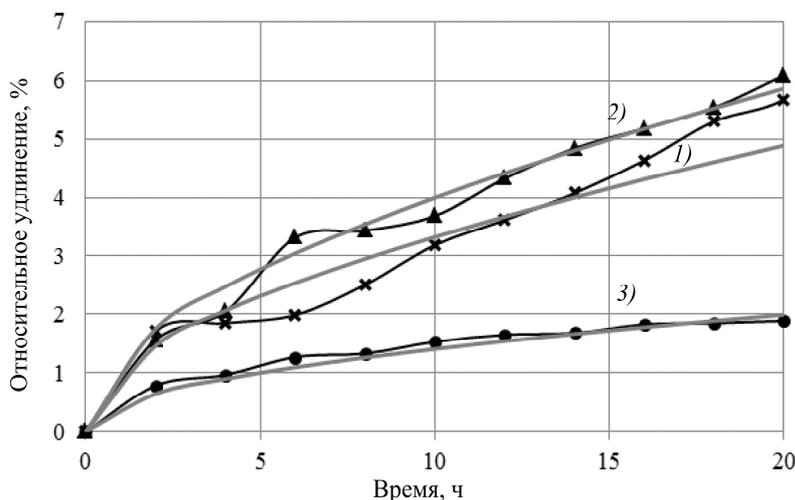


Рис. 2. Сравнение значений аппроксимирующей функции с экспериментальными данными для ползучести стали марки 40ХГМ: 1 – 560 °С, 150 МПа; 2 – 560 °С, 220 МПа; 3 – 600 °С, 150 МПа

Следовательно,

$$\frac{1}{E} d\sigma(\tau, T) = -d\varepsilon_{п}, \quad (1)$$

то есть развитие ползучести приводит к уменьшению (релаксации) напряжения. Если для данной стали известна деформация ползучести $\varepsilon_{п}$ как функция напряжения и температуры, то уравнение (1) позволяет установить связь дифференциалов напряжения и деформации ползучести, необходимую для численных расчетов. В справочных данных пакета конечно-элементного моделирования ANSYS для деформации ползучести приведены несколько аппроксимирующих функций $\varepsilon_{п}(\tau, T)$, на основе которых построены программы численного интегрирования уравнения (1) для всех компонент тензора напряжений совместно с уравнениями теплопроводности и термоупругости.

С целью подбора функции $\varepsilon_{п}(\tau, T)$ было про-

ведено экспериментальное исследование на ползучесть образцов стали 40ХГМ. От промышленной поковки стали 40ХГМ в кузнечно-прессовом цехе ОАО «Уральская кузница» были вырезаны заготовки 30×30×200 мм из середины радиуса поковки. Затем заготовки были подвергнуты отжигу по режиму: нагрев до 850 °С, выдержка 3 ч, охлаждение 2 ч с печью, далее на воздухе. Данный режим позволил получить в заготовках равновесную феррито-перлитную структуру, такую же, как после противофлокеного отжига. Далее из заготовок были выточены стандартные образцы на ползучесть с диаметром рабочей части 7 мм и произведены испытания по ГОСТ 3248–81¹. Испытания на ползу-

¹ Испытания были проведены на ОАО «Уральская кузница» (г. Чебаркуль) под руководством начальника лаборатории физико-механических испытаний ЦЗЛ Т.В. Ручевой.

чьсть производились по нескольким вариантам при температурах 560–650 °С, соответствующих температурному интервалу охлаждения поковок после отжига, т. е. получены кривые ползучести (рис. 1, 2).

В качестве аппроксимирующей функции была выбрана функция общего вида

$$\varepsilon_n = \frac{\sigma}{E} + C_1 \sigma^{C_2} \tau^{C_3+1} e^{-C_4/T} \frac{1}{C_3+1} + C_5 \sigma^{C_6} e^{-C_7/T} \tau, \quad (2)$$

для которой неизвестные коэффициенты C_1, C_2, \dots, C_7 были определены путем последовательного сопоставления с экспериментальными зависимостями $(\varepsilon_n)_{T=\text{const}} = f_1(\sigma)$; $(\varepsilon_n)_{\sigma=\text{const}} = f_2(T)$ и т. д. Для областей нестационарной и стационарной ползучести: $C_1 = 78$; $C_2 = 2,17$; $C_3 = -0,55$; $C_4 = 14\,000$; $C_5 = 750,4$; $C_6 = 4,55$; $C_7 = 28\,240$. На рис. 2 (1–3) сравниваются экспериментальные кривые зависимости и их аналитическая аппроксимация; степень их согласия можно признать достаточно хорошей.

Расчет напряжений $\sigma_z, \sigma_r, \sigma_\theta$ и $\bar{\sigma}$ при охлаждении цилиндрических поковок с учетом релаксации был проведен в пакете ANSYS путем совместного численного решения методом конечных элементов уравнения теплопроводности, возникновения упругих напряжений и уравнения вида (1) для релаксации.

Параметры расчета были приняты такими же, как в работе [3]. Рассматривается цилиндрическая поковка из стали 40ХГМ диаметром 450 мм.

Для того чтобы установить влияние релаксации напряжений на распределение их по сечению поковки, будем сравнивать соответствующие зависимости напряжений σ_z, σ_r и σ_θ от r , рассчитанные с учетом и без учета эффекта релаксации. В программном комплексе ANSYS удалось рассчитать внутренние напряжения для различных скоростей охлаждения:

1) на воздухе (рис. 3 и 4), при этом коэффициент теплоотдачи α , как и в работе [3], был принят равным $34 \text{ Вт/м}^2\text{К}$;

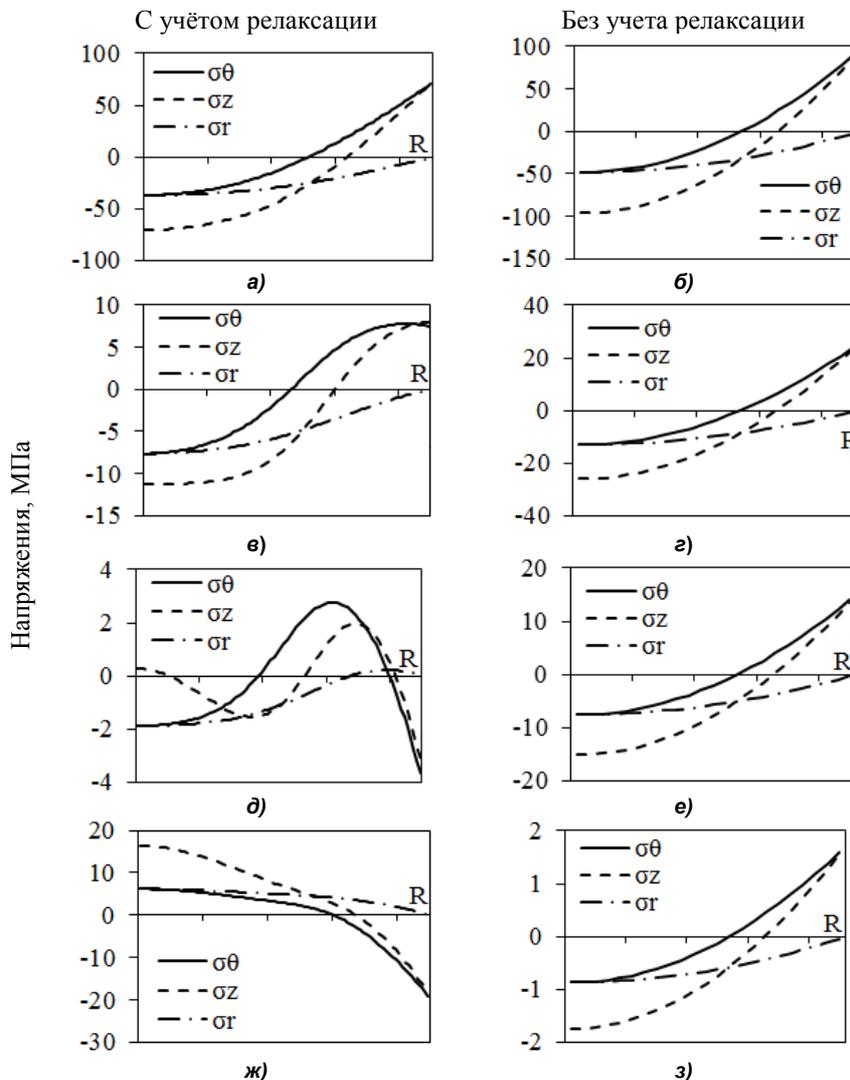


Рис. 3. Результаты расчета внутренних напряжений при охлаждении на воздухе поковки диаметром 450 мм с учетом (а, е, д, ж) и без учета релаксации (б, з, е, з): а, б – через 0,5 ч; в, з – через 5 ч; д, е – через 7 ч; ж, з – через 15 ч после начала охлаждения

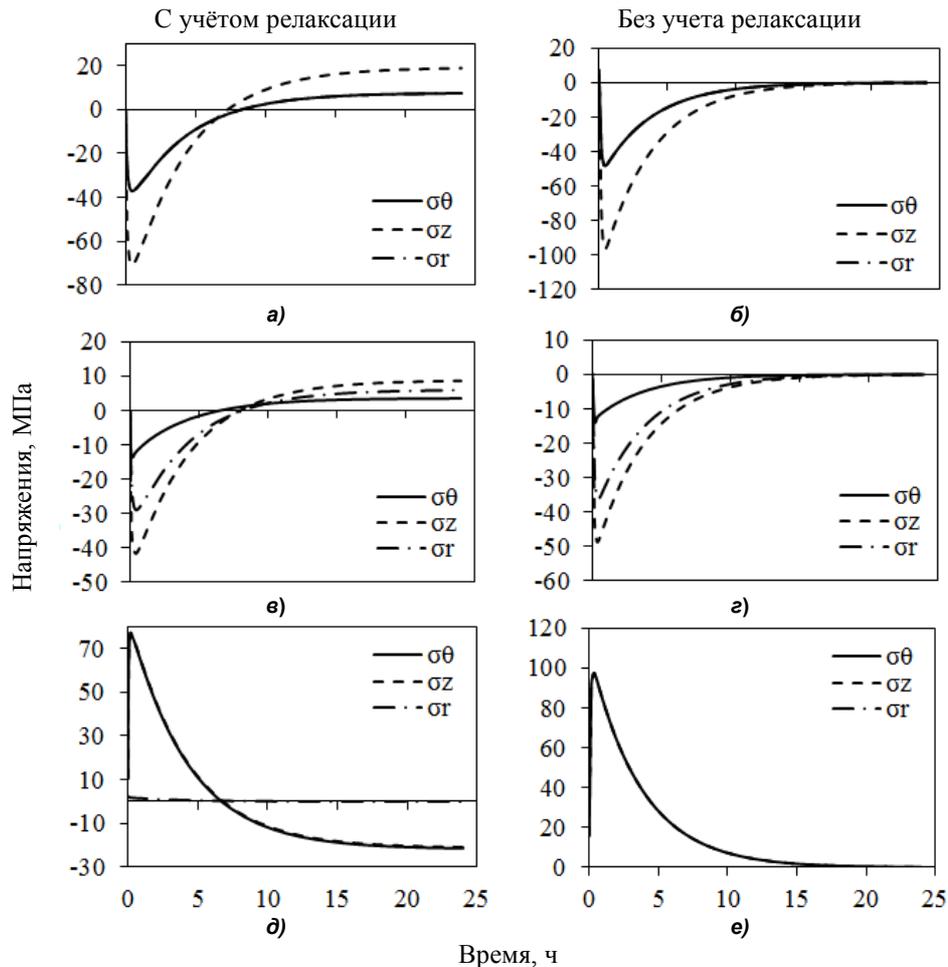


Рис. 4. Результаты расчета внутренних напряжений при охлаждении на воздухе поковки диаметром 450 мм в зависимости от длительности охлаждения с учетом (а, в, д) и без учета релаксации (б, г, е): а, б – на оси; в, г – в середине радиуса; д, е – на поверхности поковки

2) при замедленном охлаждении (рис. 5) со скоростью $\sim 13 \text{ }^\circ\text{C/ч}$ ($\alpha = 5 \text{ Вт/м}^2\text{К}$).

В случае малой длительности охлаждения напряжения σ_θ и σ_z резко уменьшаются по мере удаления от поверхности и меняют свой знак, оставаясь затем приблизительно одинаковыми, но малыми по величине. Различия в величине напряжений ещё не велико, но уже после 30-минутного охлаждения (рис. 3, а, б) σ_θ и σ_z у поверхности отличаются почти в 1,5 раза. После 30 мин охлаждения существенно возрастают и сжимающие напряжения σ_θ и σ_z вблизи оси поковки. А это означает, что теперь релаксация напряжений будет заметно проходить не только у поверхности, но и в осевой зоне. Отметим также, что увеличение выдержки приводит к уменьшению r_0 , при котором σ_θ обращается в 0. После 30 мин охлаждения температура в середине поковки составляет $633 \text{ }^\circ\text{C}$, а у поверхности – $573 \text{ }^\circ\text{C}$. Фактически не охваченным релаксацией остается участок между осевой и приповерхностной зоной, в котором напряжения σ_θ и σ_z оказываются небольшими. Релаксация напряжений у поверхности (где напряжения растягиваю-

щие) приведет к некоторому пластическому увеличению диаметра, а релаксация в осевой зоне – к аналогичному уменьшению диаметра поковки в этих зонах. Поэтому в серединной зоне должно наблюдаться дополнительное растяжение вдоль r и θ .

Расчет для поковки, охлаждающейся в течение 5 ч (рис. 3, в, г), показывает, что график радиального изменения напряжений без учета релаксации принципиально сохраняет свой вид, но величины напряжений у оси и на поверхности уменьшаются в силу снижения разности температур между поверхностью и центром ($T_n = 193 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_c = 213 \text{ }^\circ\text{C}$). В этом случае эффект релаксации приводит к уменьшению σ_θ и σ_z в осевой, и в приповерхностной зонах. Вблизи $r = R$ немного меняется характер изменения напряжений. Вместо восходящего участка появляется практически горизонтальный участок (рис. 3, в).

Для 7-часового охлаждения (рис. 3, д) характерно отчетливое формирование трех зон вдоль радиуса поковки. Дальнейшее уменьшение разности температур поверхности и центра ($T_n = 129 \text{ }^\circ\text{C}$, $T_c = 142 \text{ }^\circ\text{C}$) снижает термические напряжения.

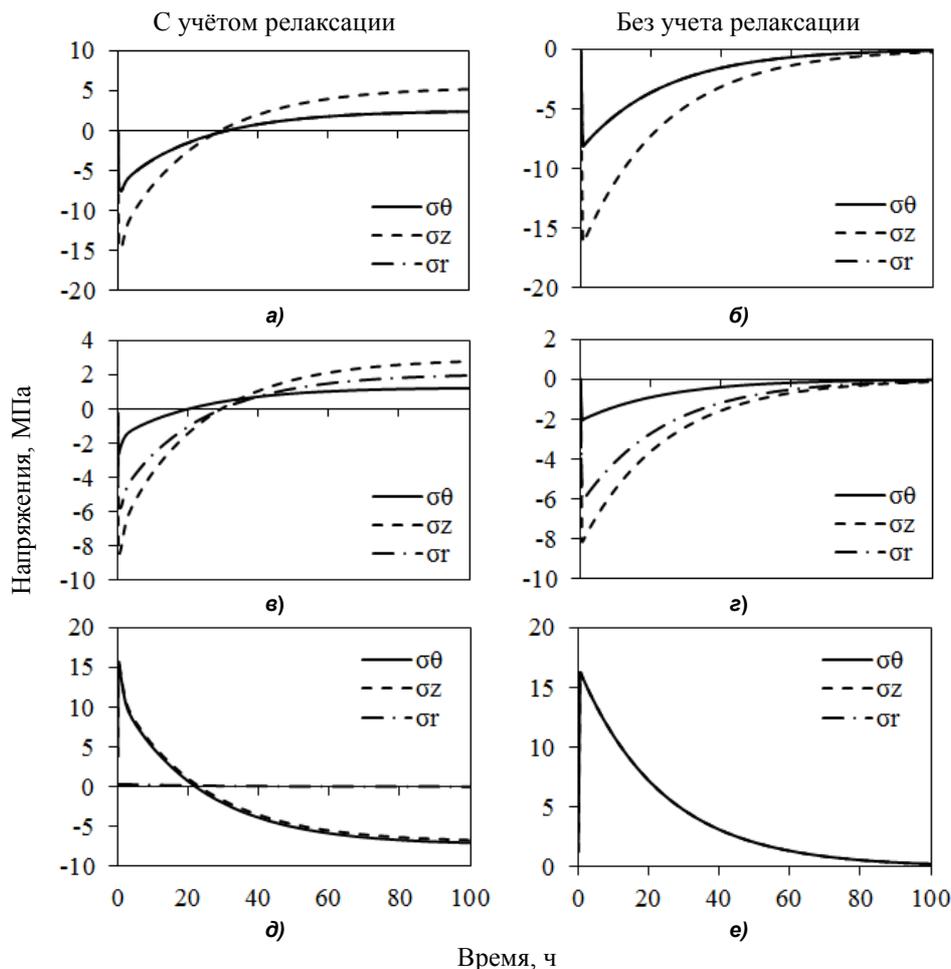


Рис. 5. Результаты расчета внутренних напряжений при замедленном охлаждении поковки диаметром 450 мм в зависимости от длительности охлаждения с учетом (а, в, д) и без учета релаксации (б, г, е): а, б – на оси; в, г – в середине радиуса; д, е – на поверхности поковки

А поскольку поверхность образца из-за релаксации была увеличена, то теперь охлаждающаяся срединная зона начинает создавать в поверхностных слоях сжимающие напряжения σ_θ . Кривые напряжений, при расчете которых релаксация не учитывалась (рис. 3, е), по-прежнему отражают растягивающие напряжения у поверхности и сжимающие напряжения на оси. В данном случае видно, что σ_θ и σ_r определяются разностью температур поверхности и центра.

После 15-часового охлаждения отчетливо наблюдается (рис. 3, ж) возникновение около оси поволок растягивающих напряжений σ_θ , σ_z и σ_r , а у поверхности – сжимающих напряжений σ_θ и σ_z , величина которых достигает 20 МПа. Расчет в варианте отсутствия релаксаций (рис. 3, з) дает $\sim 1,5$ МПа на поверхности и ~ 2 МПа у оси.

Более подробно временной характер изменения напряжений σ_θ , σ_z и σ_r на оси, при $r = 1/2 R$ и у поверхности представлены на рис. 4 с учетом релаксации и без неё. Общий характер изменения напряжений оказывается следующим: в отсутствие релаксации напряжения у поверхности растяги-

вающие, а напряжения при $r = 1/2 R$ и на оси – сжимающие. Причем в первых двух случаях (рис. 4, б, г) их графики проходят через минимум и затем начинают возрастать по модулю асимптотически, приближаясь к 0 при продолжении охлаждения. Аналогично и на поверхности, пройдя через максимум, σ_θ и σ_z уменьшаются до 0 при дальнейшем охлаждении. При учете релаксации (рис. 4, а, в, д) наблюдается, во-первых, уменьшение уровня всех напряжений, может быть, за исключением очень малых времен охлаждения, причем при времени охлаждения более 7 ч графики напряжений пересекают 0 и, по существу, напряжения превращаются в остаточные напряжения растяжения около оси и сжатия у поверхности. Аналогично и для $r = 1/2 R$. При этом сжимающие напряжения будут препятствовать образованию флокенов, в которых трещина перпендикулярна действующему напряжению. Во-вторых, следует учитывать, что сжимающие напряжения вдоль θ и z будут препятствовать образованию флокенов, плоскость которых перпендикулярна этим напряжениям, поэтому поверхность возникающего флокена

должна быть ориентирована перпендикулярно к радиусу, что в действительности довольно часто наблюдается в производстве и отмечается в публикациях [8].

Рассмотренные выше графики внутренних напряжений относились к охлаждению поковки диаметром 450 мм на воздухе. Теперь рассмотрим случай, когда поковки охлаждаются замедленно со скоростью ~ 13 °С/ч, что примерно соответствует скорости охлаждения поковки в термосе [9]. Зависимость внутренних напряжений от времени охлаждения в двух вариантах (с учетом и без учета релаксации напряжений) представлены на рис. 5. Характер изменения напряжений оказывается таким, как и в решении, рассмотренном в случае охлаждения на воздухе (см. рис. 4). В отсутствие релаксации сохраняется общий характер изменения напряжений по радиусу и по времени, но все напряжения оказываются существенно меньшими (рис. 5, б, з, е). В случае учета релаксации характер изменения напряжений также не меняется, но величина остаточных напряжений после охлаждения снижается приблизительно в 3 раза (рис. 5, а, в, д).

С точки зрения возможности образования наличие на поверхности сжимающих напряжений препятствует образованию флокенов. Также можно предположить, что сжимающие напряжения препятствуют диффузионному выходу водорода в атмосферу. Влияние внешних напряжений на диффузию обычно сводят к уменьшению энергии активации диффузии на величину $\bar{\sigma}V_M$, где $\bar{\sigma}$ – гидростатическое напряжение, равное

$$\bar{\sigma} = \frac{\sigma_r + \sigma_\theta + \sigma_z}{3}. \quad (3)$$

Поэтому в выражении для коэффициента диффузии водорода появляется дополнительный множитель

$$D_H = D_0 e^{\frac{-Q}{RT}} e^{\frac{\bar{\sigma}V_M}{RT}}, \quad (4)$$

то есть энергия активации заменяется на $Q \rightarrow Q - \bar{\sigma}V_M$, где V_M – парциальный молярный объем растворенного водорода, который оценивается в $2 \text{ см}^3/\text{моль}$. Если максимальное значение $\bar{\sigma}$ при охлаждении на воздухе у поверхности оценивается (см. рис. 3, ж) $\frac{-20 - 20 + 0}{3} = -13,3 \text{ МПа}$,

то дополнительный множитель, отражающий эффект уменьшения диффузии, будет равен $e^{\frac{\bar{\sigma}V_M}{RT}} = e^{\frac{-13,3 \cdot 10^6 \cdot 2 \cdot 10^{-6}}{8,314 \cdot 300}} = 0,99$, то есть влияние напряжений на диффузию водорода пренебрежимо мало.

Однако на самой поверхности водород, по видимому, удаляется ещё в процессе термической обработки слитков, нагрева под ковку, самойковки и охлаждения после неё, так как при ковке про-

исходит деформация с последующей рекристаллизацией, а прохождение большеугловых границ существенно увеличивает скорость диффузии водорода.

Выводы

1. При охлаждении цилиндрических поволоков в однофазной α -области возникают осевые (σ_z), радиальные (σ_r), и тангенциальные (σ_θ) напряжения. Если при аналитическом расчете без учета релаксации абсолютная величина напряжений уменьшается и стремится к нулю при подходе к комнатной температуре, то расчет с учетом релаксации внутренних напряжений показывает, что после окончания охлаждения в поковке сохраняются остаточные напряжения, причем на поверхности они сжимающие, а в центре поковки растягивающие.

2. Наличие на поверхности сжимающих напряжений препятствует раскрытию флокенов.

3. Показано, что влияние внутренних напряжений на диффузию водорода пренебрежимо мало.

Работа выполнена в рамках государственного задания Минобрнауки РФ и частично поддержана грантом РФФИ 14-03-00618.

Литература

1. Дубовой, В.Я. Флокены в сталях: моногр. / В.Я. Дубовой. – М.: Металлургиздат, 1950. – 332 с.
2. Склюев, П.В. Зависимость остаточных напряжений от скорости охлаждения после отпуска / П.В. Склюев, Б.Д. Петров // Проблемы металловедения и термообработки. – 1960. – Вып. 2. – М.; Свердловск: Машигиз. – С. 136–142.
3. Мирзаев, Д.А. Внутренние напряжения при охлаждении крупных поволоков / Д.А. Мирзаев, А.Д. Шабуров // Вестник ЮУрГУ. Сер. «Металлургия». – 2012. – Вып. 18, № 15 (274). – С. 112–115.
4. Тайц, Н.Ю. Технология нагрева стали / Н.Ю. Тайц. – М.: Металлургиздат, 1962. – 567 с.
5. Склюев, П.В. Термическая обработка крупных поволоков / П.В. Склюев. – М.: Машиностроение, 1976. – 48 с.
6. Работнов, Ю.Н. Сопротивление материалов / Ю.Н. Работнов. – М.: Физматгиз, 1962. – 456 с.
7. Борздыка, А.М. Релаксация напряжений в металлах и сплавах / А.М. Борздыка, Л.Б. Гецов. – М.: Металлургия, 1978. – 256 с.
8. Штремель, М.А. Кинетика раскрытия внутренней зернограничной трещины водородом / М.А. Штремель, А.А. Князев // Физика металлов и металловедение. – 1986. – Т. 62, № 4. – С. 645–651.
9. Шабуров, А.Д. Теплообмен при охлаждении поволоков в термосе / А.Д. Шабуров, Д.А. Мирзаев, В.А. Смолко // Вестник МГТУ им. Г.И. Носова. – 2011. – № 2. – С. 65–67.

Мирзаев Джалал Аминович, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры физического металловедения и физики твёрдого тела, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск); mirzayev@physmet.susu.ac.ru.

Шабуров Андрей Дмитриевич, и. о. начальника кузнечно-прессовой лаборатории, Челябинский филиал ОАО «Уральская кузница» (г. Челябинск); adshaburov@mail.ru.

Чернявский Александр Олегович, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной механики, динамики и прочности машин, Южно-Уральский государственный университет (г. Челябинск); cher@sopro.susu.ac.ru.

Поступила в редакцию 5 сентября 2014 г.

Bulletin of the South Ural State University
Series "Metallurgy"
2014, vol. 14, no. 3, pp. 40–47

ANALYSIS OF THERMOELASTIC STRESSES IN FORGED PRODUCTS ON ACCOUNT OF THE RELAXATION EFFECT

D.A. Mirzaev, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, mirzayev@physmet.susu.ac.ru.

A.D. Shaburov, Chelyabinsk Branch of the Urals Stampings Plant, Chelyabinsk, Russian Federation, adshaburov@mail.ru.

A.O. Chernyavsky, South Ural State University, Chelyabinsk, Russian Federation, cher@sopro.susu.ac.ru.

Since stress is one of main factors in flake formation, it is important to understand the nature of the stress state of continuously cooling cylindrical forgings. For this purpose computer calculations of internal stress distribution were made as well as the possibility of elastic deformation relaxation during cooling of forging was taken into account.

Calculations were carried out for several options at different cooling rates for three stress components – axial, radial and tangential. Calculations of the relaxation effect were made by processing and approximating the experimental data of 40KhGM steel creep in a temperature range of cooling after anti-flake heat treatment.

Calculations showed that at analytical calculations without account of relaxation the absolute stress value decreases and tends to zero when approaching room temperature, whereas calculations with account of relaxation of internal stresses showed residual stresses at the end of forging cooling. Moreover, they are compressive on the surface and tensile in the center of the forging. The impact of these stresses on the flake disclosure was shown.

The second step was to analyze the influence of internal stresses on hydrogen diffusion and flake formation. The impact of external stresses on diffusion is usually limited to the decrease of the activation energy of diffusion to an additional value. Calculations have shown that this value has no effect on the activation energy.

The results of this article can be useful to specialists dealing with problems of flake formation in steel as well as to experts in computer modeling of technological processes in metallurgy.

Keywords: air cooling, internal pressure, stress relaxation, creep, stress analysis, simulation of cooling, forgings, flake formation, flakes, 40KhGM steel.

References

1. Dubovoy V.Ya. *Flokeny v stalyakh* [Flakes in Steels]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1950. 332 p.
2. Sklyuev P.V., Petrov B.D. [Dependence of Residual Stress on the Cooling Rate After Tempering]. *Problemy metallovedeniya i termoobrabotki* [Problems of Metallurgy and Heat Treatment], 1960, vol. 2. pp. 136–142. (in Russ.)
3. Mirzaev D.A., Shaburov A.D. [Internal Stresses During Cooling of Large Forgings]. *Bull. of the South Ural St. Univ. Ser. Metallurgy*, 2012, no. 15 (274), issue 18, pp. 112–115. (in Russ.)
4. Tayts N.Yu. *Tekhnologiya nagreva stali* [Heating Technology of Steel]. Moscow, Metallurgizdat Publ., 1962. 567 p.

5. Sklyuev P.V. *Termicheskaya obrabotka krupnykh pokovok* [Heat Treatment of Large Forgings]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 1976. 48 p.
6. Rabotnov Yu.N. *Soprotivlenie materialov* [Strength of Materials]. Moscow, Fizmatgiz Publ., 1962. 456 p.
7. Borzdyka A.M., Getsov L.B. *Relaksatsiya napryazheniy v metallakh i splavakh* [Stress Relaxation in Metals and Alloys]. Moscow, Metallurgiya Publ., 1978. 256 p.
8. Shtremel' M.A., Knyazev A.A. [Kinetics of Disclosure of Internal Grain Boundary Cracks by Hydrogen]. *Fizika metallov i metallovedenie*, 1986, vol. 62, no. 4, pp. 645–651. (in Russ.)
9. Shaburov A.D., Mirzaev D.A., Smolko V.A. [Heat Transfer During Cooling of Forgings in a Thermos]. *Vestnik of Nosov Magnitogorsk State Technical University*, 2011, no. 2, pp. 65–67. (in Russ.)

Received 5 September 2014