

УДК 621.852.2

DOI: 10.30987/article\_5db95e858ffc15.80299278

С.В. Шишкин

## КОНСТРУКЦИЯ И РАСЧЁТ ТЕРМОМЕХАНИЧЕСКОГО ГАЙКОВЁРТА ДЛЯ ЗАТЯЖКИ РЕЗЬБЫ БОЛЬШОГО ДИАМЕТРА

Предложена оригинальная конструкция гайковёрта для затяжки резьбы большого диаметра. В качестве силового привода используется труба из сплава ТН1, в которой инициирована возвратная память в осевом направлении при заданной деформации сжатием. Особенность термомеханического привода состоит в том, что величина развиваемого усилия падает по мере его перемещения, поэтому

для расчёта силы затяжки применяется метод термомеханических диаграмм. Показано, что по сравнению с гидравликой такой силопривод имеет целый ряд преимуществ.

**Ключевые слова:** память формы, термомеханический возврат, силовой привод, болт, гайка, сила затяжки, реактивное напряжение, деформация, температура.

S.V. Shishkin

## DESIGN AND COMPUTATION OF THERMOMECHANICAL NUTRUNNER FOR LARGE DIAMETER THREAD TIGHTENING

An original design of a nutrunner for tightening threaded joints of a large diameter is offered. The operation principle of the device consists in drawing out a bolt or a stud and in a free tightening of a nut for a specified angle. As a result of thread drawing out and a nut turn a value of a gap between its support surface and a flange plane will be already calibrated. An adjustment of a residual clearance after an effort relief from a power drive ensures a required value of tightening force.

computation one uses a dependence upon a deformation value of power element length under-restoration (thermomechanical diagram), reasoning from which there is obtained a formula for the definition of the angle of a nut turn to ensure a required tightening of a threaded joint.

At the expense of high specific power of a thermomechanical power drive the device has comparatively small dimensions and mass. It allows installing a nutrunner set on each nut or on every other one and tightening all bolts of the joint simultaneously. The solution of the problem to ensure a uniform tightening of threaded joints keeps their initial life and reduces assembling labor-output ratio as it allows rejecting a technology of tightening bolts and studs located cross-wise with small pitches that are widespread in mechanical engineering.

**Key words:** shape memory, thermomechanical return, power drive, bolt, nut, tightening force, reactive stress, deformation, temperature.

A simplicity, reliability and compactness of the design is achieved at the expense of the application of a power element as a pipe made of alloy TN1 in which a return shape memory in the axial direction is initiated. Its operation principle is based on the regeneration of a reactive effort as a result of a phase transformation during heating because of the resistance of drawing out a bolt or a stud. An increasing force depends upon element dimensions, alloy energy and counteraction rigidity. That is to say, in contrast to hydraulics its value drops in the process of pipe elongation. For the force

### Введение

Одна из технических проблем, которая возникает при ремонте и монтаже уникальных конструкций, состоит в затяжке болтов и шпилек большого диаметра. К ним относятся атомные и химические реакторы, металлургическое, нефтяное и газодобывающее оборудование, прессы с рабочим усилием более тысячи тонн, энергетические установки и т.п. Для решения этой задачи используются лебёдки, специальные тракторы и устройства, мощность которых тратится на преодоление силы трения между гайкой и сопрягаемой опорной поверхностью фланца при затяжке резьбового соединения.

Более эффективный подход заключается в предварительной вытяжке шпильки или болта с заданной силой и свободном завёртывании гайки до упора без трения. Для этой цели применяются специальные гайковёрты, оснащённые гидроприводом [1; 2]. Например, при затяжке шпилек М170 главного разёма атомного реактора на российских АЭС используются гидравлические домкраты с развиваемой максимальной силой 4 МН, смонтированные на планшайбе, оборудованной крановым хождением.

Применение эффекта памяти материала позволяет создавать более компактные, простые и надёжные в эксплуатации сило-

вые устройства по сравнению с гидравлической [3]. Термомеханический гайковёрт имеет существенно меньшие габариты и вес, значительную удельную силоотдачу, низкую стоимость и высокую ремонтпригодность, а также легко переналаживается на другой типоразмер резьбового соединения.

Практическая автономность в работе даёт возможность снизить численность обслуживающего персонала и обеспечить более равномерную затяжку всех болтов стыка. Замена гидравлического привода на термомеханический исключает маслянососную станцию, гидроцилиндр, коммуникации и гидроарматуру, что повышает безопасность работ при монтаже и сборке конструкции, так как гидравлика находится под высоким давлением.

Существует и другая проблема – это неравномерность затяжки болтов, что может привести к нарушению герметичности уплотняемого стыка ответственных конструкций и даже усталостному разрушению резьбовых соединений. Неравномерность их затяжки возникает из-за неодновременного затягивания болтов в результате изгиба фланцев и зависит от жёстко-

сти деталей пакета. В свою очередь, величина силы затяжки меняется при незначительных деформациях болтов и промежуточных деталей пакета, поскольку это происходит вследствие упругого нагружения узла.

Неравномерность затяжки существенно уменьшается при последовательной обтяжке болтов и шпилек, расположенных крест-накрест малыми шагами. Однако в этом случае возрастает трудоёмкость сборки, а также исчерпывается часть ресурса резьбовых соединений, что ведёт к снижению их надёжности. Подобная технология с обязательным контролем вытяжки болтов применяется при монтаже энергетического, химического и металлургического оборудования, а также главного разъёма атомных реакторов и при креплении генераторов ГЭС.

Предлагаемые термомеханические гайковёрты могут быть установлены на каждой гайке или через одну автономно. При этом затяжка всех болтов или шпилек уплотняемого стыка производится одновременно при включении силовых устройств в единую электрическую цепь.

### Описание конструкции

Конструкция термомеханического гайковёрта (рис. 1) включает в себя силопривод в виде силового элемента 4 с электронагревателем 5, а также хвостовик 3, опору 2 и гаечную головку 1. В резьбовое отверстие хвостовика 3 вкручивается втулка 7, в отверстие которой по посадке устанавливается индикатор 8 с измерительным стержнем 6. Гаечная головка 1 имеет шесть сквозных резьбовых отверстий, выполненных перпендикулярно к её оси вращения и изготовленных через равный угловой шаг 60 град. Гаечная головка 1 свободно устанавливается на гайку *E* за счёт внутреннего отверстия в виде шестигранника, профиль которого точно повторяет ответное продольное сечение гайки *E*.

В данном устройстве силовой элемент 4 представляет собой трубу из сплава ТН1, в которой инициирована возвратная память формы в осевом направлении при заданной деформации сжатием [3; 4]. Для того чтобы затянуть стык, состоящий из

двух фланцев *A* и *C* и прокладки *B*, с помощью болта *D* гайкой *E*, на неё свободно надевается гаечная головка 1 и устанавливается опора 2. Первоначально гайка *E* на болте *D* завёрнута до упора в верхний фланец *C*. Затем на законцовку болта *D* навёртывается резьбовой хвостовик гайковёрта 3 при предварительной установке без зазоров силового элемента 4, который центрируется по кольцевым проточкам на верхней плоскости опоры 2 и нижней поверхности хвостовика 3.

Устройство работает следующим образом. При нагреве электронагревателем 5 силовой элемент 4 в результате термомеханического возврата [5] удлиняется и, опираясь одним концом на опору 2, через заплечики хвостовика 3 вытягивает болт *D*. При этом паразитные деформации пакета *A-B-C* измеряются индикатором 8, установленным по посадке в резьбовой втулке 7 хвостовика 3, с помощью измерительного стержня 6. Гайка *E* с помощью гаечной

головки 1 и стержня с резьбовым хвостовиком (на рис. 1 не показан) свободно завёртывается на заданный угол  $\varphi$  через боковую прорезь в опоре 2.

После затяжки болта  $D$  с тарированной силой кольцевой нагреватель 5 снимается и происходит естественное охлаждение на воздухе силового элемента 4. В результате он сокращается в осевом направлении, после чего с помощью стержня можно открутить резьбовой хвостовик 3, снять опору 2 и гаечную головку 1.

Так как гайка  $E$  завёртывается на угол  $\varphi$  не до упора, то между её торцом и опорной поверхностью фланца имеется некоторый зазор. При снятии силы обжатия от силового элемента 4 этот зазор выбирается и болт нагружается требуемой силой  $P$ . Поскольку величина упругой деформации деталей пакета меньше обратного осевого перемещения силового элемента, то его легко снять после охлаждения, так как хвостовик 3 гайковёрта откручивается практически без усилия.

Обычно термомеханический гайковёрт обеспечивает затяжку болтов и шпилек в определённом интервале диаметров и шагов резьбы и укладывается в чемодан с набором резьбовых головок, а также гаечных головок 1 с разным внутренним шестигранным отверстием под гайку  $E$ .

В отличие от гидравлики, развиваемая сила термомеханического силопривода падает по мере перемещения вплоть до нуля. Поэтому требуемую силу затяжки фиксируют по тарировочному графику в зависимости от величины паразитных деформаций деталей узла. Они определяются смещениями стягиваемых деталей пакета,

выборкой люфтов за счёт отклонений их поверхностей от плоскости, растяжением хвостовика 3 и податливостью резьбы в соединении «хвостовик - болт» и контролируются по индикатору 8.

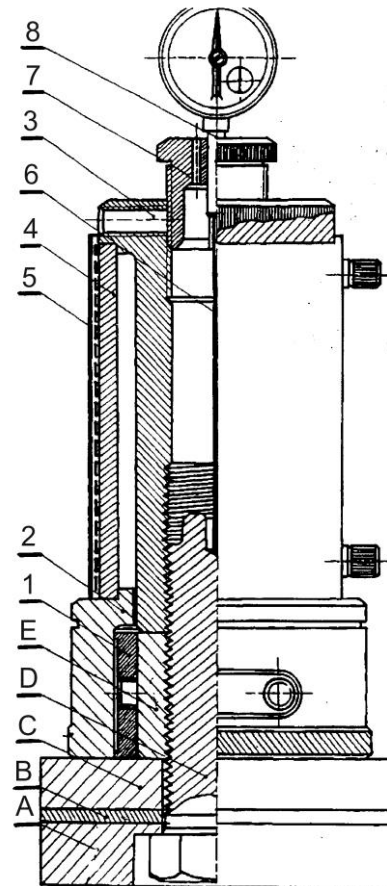


Рис. 1. Конструкция термомеханического гайковёрта на обратимой памяти с трубчатым силовым элементом из сплава ТН1:  
1 – гаечная головка; 2 – опора; 3 – хвостовик;  
4 – силовой элемент; 5 – электрический нагреватель; 6 – измерительный стержень;  
7 – втулка; 8 – индикатор; А – нижний фланец;  
В – прокладка; С – верхний фланец;  
D – болт; E – гайка

### Принцип действия термомеханического силопривода

Сплавы на основе никелида титана с эффектом памяти формы очень привлекательны для создания специальных силовых устройств из-за высокого уровня термомеханических, антикоррозионных и механических свойств [6].

Память формы – это эффект частичного или полного возврата к исходному состоянию детали, деформированной при температуре ниже интервала прямого мар-

тенситного превращения, при нагреве в температурном интервале обратного мартенситного перехода. При этом сплав в деформированном состоянии может находиться достаточно долго. Если создать препятствие процессу восстановления, то при нагреве в силовом элементе возникают реактивные напряжения. В этих материалах точки фазовых превращений определяются температурами начала и конца пе-

рестройки кристаллической решётки при нагреве и охлаждении. Для силового привода используют сплав ТН1 с интервалом фазовых переходов в области температур +50...+90 град.

Термомеханический гайковёрт должен развивать пиковую силу при абсолютно жёстком противодействии и многократном применении. Величина силы определяется энергетикой сплава при реализации термомеханического возврата и размерами силового привода. Для обеспечения работоспособности фазовые превращения в материале должны проходить только в заданном интервале температур при естественном охлаждении. Для определения основных размеров силового цилиндра и задания требуемой силы затяжки резьбы рассмотрим элементы сертификации сплава ТН1.

Реализация эффекта памяти образца при заданной деформации растяжением показана на рис. 2. Поскольку интервал

температур прямого мартенситного превращения находится выше точки  $T_H=20^\circ\text{C}$ , то его деформацию проводят в обычных условиях. После снятия задающей нагрузки идёт упругая разгрузка образца. При нагреве в свободном состоянии в интервале температур начала  $A_H$  и конца  $A_K$  обратного мартенситного превращения происходит сжатие образца до первоначального размера в результате фазового перехода мартенсита в высокотемпературную фазу – аустенит. Этот процесс заканчивается в точке  $A_K$ , где сплав уже полностью находится в аустените. При нагреве выше данной точки какого-либо изменения размера уже не происходит. При реализации термомеханического возврата в свободном состоянии (кривая 1 на рис. 2) деформация термического восстановления формы  $\varepsilon_f$  может быть меньше значения заданной (пластической) деформации  $\varepsilon_p = \varepsilon - \varepsilon_e$  на величину некоторой остаточной деформации  $\varepsilon_0 = \varepsilon_p - \varepsilon_f$ .

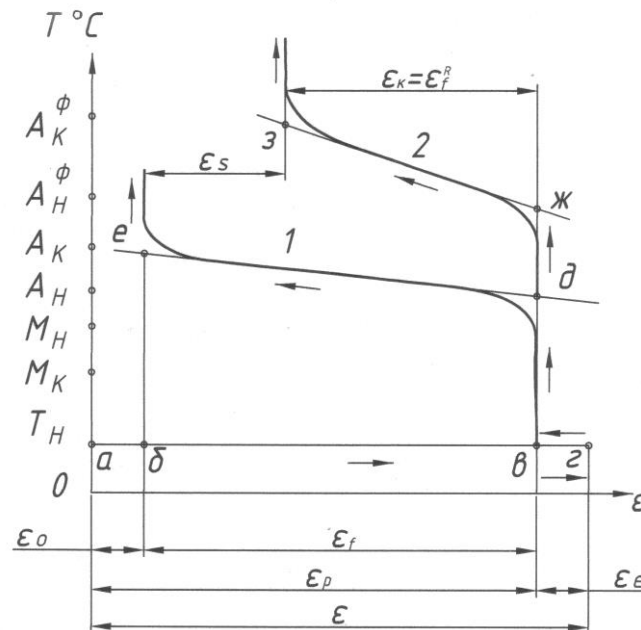


Рис. 2. Диаграммы термического восстановления формы образца в свободном состоянии (1) и при противодействии (2):  $M_H, M_K$  – начальная и конечная температуры прямого мартенситного превращения;  $A_H, A_K$  – температуры начала и конца обратного мартенситного превращения при нагреве;  $A_H^\phi, A_K^\phi$  – температуры начала и конца восстановления формы;  $T_H$  – температура деформации (нормальная,  $20^\circ\text{C}$ );  $\varepsilon_s, \varepsilon_k$  – деформация недовосстановления и контактирующей детали за счёт её противодействия;  $\varepsilon_f, \varepsilon_f^R$  – деформация термического восстановления в свободном состоянии и при наличии противодействия;  $\varepsilon_0, \varepsilon_e$  – остаточная деформация и деформация упругого восстановления;

$\epsilon_p, \epsilon$  – пластическая и заданная деформация

Фазовый переход мартенсита в аустенит при нагреве в условиях противодействия осуществляется по кривой 2 и определяется не только температурой, но и напряжением. Поэтому температуры начала и конца восстановления формы  $A_n^\phi, A_k^\phi$  (особенно точка  $A_k^\phi$ ) по сравнению с температурами  $A_n$  и  $A_k$  возрастают. Из-за определённой величины деформации недовосстановления  $\epsilon_s$ , которая зависит от жёсткости сопротивления, деформация термического восстановления  $\epsilon_f^R$  по сравнению с реализацией процесса в свободном состоянии снижается:

$$\epsilon_f^R < \epsilon_f, \quad \epsilon_f^R = \epsilon_p - \epsilon_s - \epsilon_0.$$

Величина же  $\epsilon_f^R = \epsilon_k$  определяется деформацией детали, находящейся в контакте с образцом. Для никелида титана объём памяти формы составляет  $\epsilon_v = 0,08$  при заданной деформации растяжением и  $\epsilon_v = 0,04$  при сжатии. Под объёмом памяти  $\epsilon_v$  понимают критическую деформацию, при которой ещё отмечается полное восстановление исходного размера детали.

Основной деформационно-силовой характеристикой сплавов с памятью формы в интервале мартенситных превращений является термомеханическая диаграмма. Она представляет из себя зависимость

реактивных напряжений возврата от величины деформации недовосстановления. Её определяют при сертификации материала в результате испытания серии образцов при заданной деформации растяжением [3].

Для построения этой зависимости берётся партия образцов одной плавки, одинакового химического состава и термообработки, изготовленных по единой технологии. Каждый образец из сплава ТН1 деформируется в мартенсите на заданную величину деформации при температуре  $T_n = 20^\circ\text{C}$ . После упругой разгрузки до нуля образец закрепляют и нагревают выше температуры  $A_k^\phi$ . Процесс генерирования напряжений возврата схематично показан линиями  $BM, JL, HC, KD$  на рис. 3. В результате статистической обработки совокупность точек  $\{M, L, C, D\}$  может быть описана функцией  $\sigma_R = f(\epsilon_s)$ . Методически и технически термомеханическую диаграмму 1 получают при условии абсолютно жёсткого противодействия при измерении рабочей длины образца после его упругой разгрузки, так как  $\epsilon_s = \epsilon - \epsilon_0$ . Величина реактивного напряжения однозначна и не зависит от пути реализации термомеханического возврата, что показано линиями  $KC, KHC$  и  $HC$  на рис. 3.

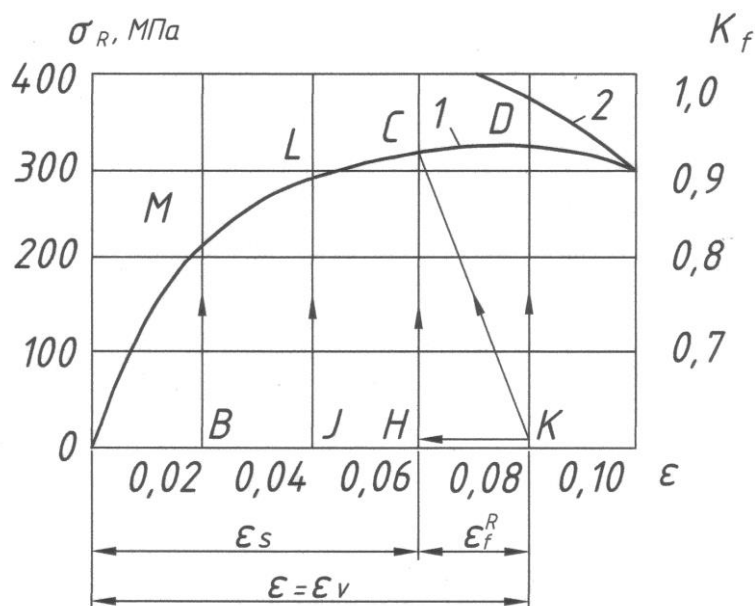


Рис. 3. Графическая иллюстрация методики построения термомеханической диаграммы (1) и определения объёма памяти формы (2)

При построении этой зависимости обычно рассматривается интервал заданной деформации до величины объёма памяти  $\varepsilon < \varepsilon_V$ , где напряжение  $\sigma_R$  достигает своего максимума, а затем начинает снижаться. Восходящую ветвь диаграммы 1 в инженерной практике, как правило, описывают степенной функцией по аналогии с кривой растяжения.

$$\sigma_R = A \varepsilon_s^m,$$

где  $A$  и  $m$  – коэффициенты, учитывающие особенности структуры, химического состава и термической обработки.

Отметим, что кривая растяжения сплава в мартенсите лежит ниже функции (1). Характер диаграммы и величина напряжений возврата зависят от вида заданной деформации. Так как стандартную диаграмму получают при растяжении, то для другого вида деформации её необходимо пересчитать по формулам работы [3] или определить по результатам соответствующих испытаний.

На рис. 3 также показано определение объёма памяти формы как точки заметного снижения коэффициента термического восстановления  $K_f = L_f/L$ , где  $L$  – размер образца в исходном состоянии,  $L_f$  – длина образца после свободного восстановления при нагреве до температуры  $A_k$ . Обычно  $K_f$  должен составлять не менее 0,96...0,98. На основании термомеханической диаграммы определяют рабочую характеристику силового привода и его основные размеры.

Двухсторонний эффект памяти, или обратимая память, – это свойство материала многократно изменять, а также восстанавливать свою форму в процессе охлаждения и нагрева в интервале фазовых переходов. Для данного вида термомеханического возврата роль внешнего усилия играют дефекты различной природы. Поэтому источник внутренних напряжений можно создать специальной деформационной и термической обработкой (трениров-

кой). Такой материал изменяет свою форму при нагреве и вновь возвращается к ней при охлаждении без какого-либо воздействия внешней нагрузки. Объём обратимой памяти в 5...10 раз ниже, чем для прямой памяти, и составляет для никелида титана порядка 0,010...0,015.

При температуре выше 280°C происходит существенное падение величины реактивных напряжений из-за «склероза» памяти. Поэтому мощность спирального электронагревателя с учётом внешней тепловой изоляции корпуса подбирают таким образом, чтобы силовой элемент прогревался не выше 180...200°C. Такой температуры вполне достаточно для срабатывания гайковёрта, что также гарантирует сохранение его работоспособности. Кроме того, рекомендуется сразу отключать электропитание после срабатывания устройства. Работоспособность перегретого силового элемента можно восстановить в стационарных условиях термомеханической обработкой (такой же, как и при инициировании в нём возвратной памяти).

Термомеханическую диаграмму при заданной деформации сжатием получали в результате натуральных испытаний силовых элементов на прессе, оснащённом индикатором развиваемого усилия. Так как величина реактивного напряжения не зависит от реализации термомеханического возврата в силу одновариантности обратного превращения [6], то диаграмму определяли при задании деформации недовосстановления за счёт выборки начального зазора между силовым элементом и опорой прессы. Исходный зазор задавали за счёт толщины мерных прокладок. В результате нагрева силовой элемент выбирает этот зазор и развивает реактивное усилие. Его измерение должно осуществляться при значительной силовой жёсткости прессы, в противном случае рабочая характеристика будет заниженной, а усилие затяжки резьбы – завышенным.

### Методика расчёта

Рассмотрим задачу установки требуемой силы затяжки  $P_6$  по углу поворота  $\varphi$  рукоятки, вкручиваемой в резьбовое от-

верстие гаечной головки 1 через прорезь в опоре 2. Угол поворота  $\varphi$  отсчитывается по

лимбу с точностью до  $0,5^0$  на наружной цилиндрической поверхности опоры 2.

Из условия совместности деформаций можем записать:

$$\varepsilon_s = \varepsilon_v - \varepsilon_f = \varepsilon_v - \frac{1}{L} \left( \delta + \frac{\varphi s}{360^0} \right),$$

где  $\varepsilon_s$  – величина деформации недовосстановления;  $\varepsilon_v$  – объём памяти формы;  $\varepsilon_f$  – термически обратимая деформация силового элемента 4;  $\delta$  – суммарная величина паразитных смещений стягиваемых дета-

лей узла, измеряемая индикатором 8;  $s, L$  – шаг резьбы болта  $D$  и длина силового элемента соответственно.

Если представить термомеханическую диаграмму в виде

$$P_R = A F \varepsilon_s^m,$$

где  $F$  – площадь поперечного сечения силового элемента 4, то, полагая  $P_R = P_6$ , получаем:

$$\varphi = 360^0 \frac{L}{s} \left\{ \varepsilon_v - [(P_6 / A F)^{1/m} + \delta / L] \right\}. \quad (1)$$

Тарировочная номограмма для определения угла  $\varphi$  при заданной силе затяжки  $P_6$  для определённого типоразмера силового элемента 4 термомеханического гайковёрта приведена на рис. 4. Из формулы

(1) следует, что с увеличением паразитных деформаций стягиваемого пакета деталей величина угла поворота несколько снижается, что показано соответствующими конгруэнтными кривыми на рис. 4.

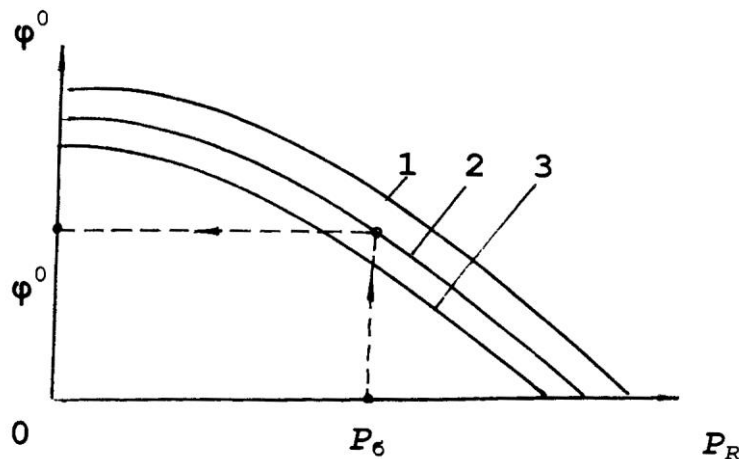


Рис. 4. Номограмма для определения угла закручивания гайки для заданной силы затяжки резьбы: 1 –  $\delta_1$ ; 2 –  $\delta_2$ ; 3 –  $\delta_3$ ;  $\delta_3 > \delta_2 > \delta_1$

В целях эксплуатационной безопасности в ответственных конструкциях величина напряжения от затяжки не должна превышать половину предела текучести материала болта. Осевая деформация термического восстановления силового элемента 4 под нагрузкой обычно составляет не более 0,3%. Поэтому длина силового элемента 4 должна быть меньше длины болта  $D$  в 3-4 раза.

Для более равномерного прогрева по радиусу и обеспечения устойчивости в осевом направлении толщину стенки силового элемента 4 берут в пределах  $h=8...16$  мм. Отсюда диаметр срединной поверхности трубы приблизительно равен

$$D_{cp} = P_6 / \pi h \sigma_R,$$

где  $\sigma_R$  – напряжение возврата, величину которого с определённым запасом принимают равной 200 МПа.

**Заключение**

Опытное внедрение партии подобранных силовых устройств при монтаже одного из химических реакторов доказало их

высокую эффективность при обеспечении равномерности затяжки болтов уплотняемого стыка с заданной силой.

**СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ**

1. Гидравлический гайковёрт: пат. № 2177401 / Ганин Ф.Г. - 2001.
2. Гидравлический гайковёрт: пат. № 2089376 / Киек В.А., Балло Г.Г., Гайдуков В.В., Левтов С.З., Попова Л.Я. - 1997.
3. Шишкин, С.В. Расчёт и проектирование силовых конструкций на сплавах с эффектом памяти формы / С.В. Шишкин, Н.А. Махутов. - М.: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2007. - 412 с.

1. *Hydraulic Nutrunner*: Pat. No. 2177401 / Ganin F.G. – 2001.
2. *Hydraulic Nutrunner*: Pat. No. 2089376 / Kiek V.A., Ballo G.G., Gaidukov V.V., LevtoV S.Z., Popova L.Ya. – 1997.
3. Shishkin, S.V. Computation and design of alloy power structures with effect of shape memory / S.V. Shishkin, N.A. Makhutov. – М.: RC “*Regular and Random Dynamics*”, 2007. – pp. 412.

4. Осука, К. Сплавы с эффектом памяти формы: [пер. с япон.] / К. Осука, К. Симидзу, Ю. Судзуки; под ред. Х. Фунакубо. - М.: Металлургия, 1990. - 224 с.
5. Хачин, В.Н. Никелид титана: структура и свойства / В.Н. Хачин. - М.: Наука, 1992. - 159 с.
6. Лихачёв, В.А. Материалы с эффектом памяти формы: справ. изд.: в 4 т. / В.А. Лихачёв. - Л.: ЛГУ, 1998.

4. Ostsuka, K. Alloys with form memory effect: [transl. from Japan] / K. Ostsuka, K. Simidzu, Yu. Sudzuki; under the editorship of H. Funakubo. – М.: *Metallurgy*, 1990. – pp. 224.
5. Khachin, V.N. *Titanium Nickelid: Structure and Properties* / V.N. Khachin. – М.: Science, 1992. – pp. 159.
6. Likhachyov, V.A. *Materials with Effect of Shape Memory*: reference edition: in 4 Vol. / V.A. Likhachyov. – L.: LSU, 1998.

Ссылка для цитирования:

Шишкин, С.В. Конструкция и расчёт термомеханического гайковёрта для затяжки резьбы большого диаметра / С.В. Шишкин // Вестник Брянского государственного технического университета. – 2019. – № 10. – С. 11 – 18. – DOI: 10.30987/article\_5db95e858ffc15.80299278.

Статья поступила в редакцию 10.09.19

Рецензент: д.т.н., профессор Брянского государственного технического университета,

член редсовета журнала «Вестник БГТУ»

Петрешин Д.И.

Статья принята к публикации 16. 09. 19.

**Сведения об авторах:**

Шишкин Сергей Виленович, д.т.н., профессор Московского авиационного института, 117513 г. Москва, Ленинский проспект, д.129, корп.1, кв.697,

Shishkin Sergey Vilenovich, Dr. Sc. Tech., Prof., Moscow Aircraft Institute, e-mail: [sshisha@yandex.ru](mailto:sshisha@yandex.ru).

тел. 8(495)438-19-64, 8-915-371-76-01, e-mail: [sshisha@yandex.ru](mailto:sshisha@yandex.ru).