

К методике определения механических характеристик материалов при испытании образцов на растяжение при повышенных температурах

В. Э. Филатов^а, А. П. Зиньковский^а, К. Н. Подгорский^б, И. Л. Гликсон^б

^а Институт проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, Киев, Украина

^б ПАО “Мотор Сич”, Запорожье, Украина

Представлена методика определения механических характеристик материалов для современных авиационных газотурбинных двигателей по результатам испытаний образцов на одноосное растяжение в условиях повышенных температур. Методика позволяет учитывать погрешности измерения, возникающие при использовании датчиков деформации современных испытательных систем вследствие несоосности силовой цепочки и влияния температуры. Апробация методики проиллюстрирована на примере одноосного растяжения образцов из сплава ЭИ962 (11Х11Н2В2МФ).

Ключевые слова: образец, одноосное растяжение, механические характеристики, датчик деформации, температура.

Постановка задачи. В соответствии с существующими нормативными документами сертификации авиационных газотурбинных двигателей (АГТД) обязательным является проведение специальной квалификации используемых при их изготовлении материалов по результатам испытаний образцов из заготовок соответствующих деталей двигателя, полученных по серийной технологии, на растяжение, ползучесть и длительную прочность, мало- и многоцикловую усталость, а также по установлению скорости роста трещины усталости [1].

Квалификационным испытаниям, которые проводятся строго по стандартам, предшествуют экспериментальные исследования. Их цель заключается в изучении поведения материала под действием тех или иных факторов, отражающих условия эксплуатации. Одним из таких факторов является температура, которая для авиационных материалов может изменяться от комнатной до 1000°C и более. Такие работы могут быть регламентированы индивидуальными методиками, разработанными с учетом положений действующих стандартов. Основным требованием к проведению испытаний является точность оценки необходимых механических характеристик материалов.

Характеристики прочности и пластичности материала, такие как модуль упругости, условный предел текучести, предел пропорциональности и относительное удлинение, определяются на основании диаграмм деформирования образцов при одноосном растяжении в заданном температурном диапазоне с использованием стандартных методик [2–4].

Для измерения деформации образца в современных испытательных машинах с цифровым программным управлением, как правило, используются датчики деформации (экстензометры). Рассмотрим три возможные погрешности при определении модуля упругости E , предела пропорциональности $\sigma_{\text{пц}}$ и предела текучести $\sigma_{0,2}$ материала, обусловленные:

несоосностью силовой цепочки испытательной машины, вследствие чего проявляется составляющая деформации, вызванная изгибом образца при растяжении;

использованием высокотемпературного экстензометра для испытания при комнатной температуре;

зависимостью показаний экстензогра от температуры испытаний (предполагается, что используется датчик деформации, приспособленный для работы в условиях нагрева, т.е. высокотемпературный экстензогра).

Две последние погрешности обусловлены паспортными характеристиками датчика и не зависят от оператора, выполняющего испытание. Анализ результатов многочисленных экспериментов, проведенных в Институте проблем прочности им. Г. С. Писаренко НАН Украины, показывает, что большей из них является температурная погрешность. В диапазоне температур до 1000°C она, как правило, не превышает 3% измеряемой величины деформации и может учитываться путем дополнительной калибровки датчика с использованием соответствующего оборудования.

Величина погрешности, обусловленная несоосностью силовой цепочки, значительно зависит от квалификации оператора. Практика показывает, что при проведении испытаний без надлежащих мер по ее выравниванию можно получить как завышенные, так и заниженные значения модуля упругости материала, отличающиеся от истинных на 10% и более.

Для достоверного определения механических характеристик материала в общем случае необходимо учитывать все указанные виды погрешностей. Однако, как следует из анализа существующих нормативных документов, этот вопрос не нашел в них должного отражения. Только в [5] отмечается, что для учета составляющей деформации, вызванной изгибом образца при растяжении, необходимо использовать два экстензогра. Целью настоящей работы является разработка методических рекомендаций по определению механических характеристик материалов по результатам испытаний образцов на одноосное растяжение.

Основные положения методических рекомендаций. Для решения задачи экспериментальной оценки возможных погрешностей при испытаниях образцов на одноосное растяжение и их учета при определении механических характеристик материала используются два экстензогра: датчик для комнатной температуры D_k , который лишен температурной погрешности и может служить в качестве калибровочного, и высокотемпературный датчик D_T . Оба датчика должны быть подключены к индивидуальным каналам системы измерения испытательной машины.

Желательно, чтобы датчик D_k как калибровочный обеспечивал максимальную точность измерения. Это отчасти можно достичь его тщательной калибровкой перед началом испытаний.

Следует отметить, что при отсутствии нагрева образца показания экстензогра могут несколько отличаться. Даже если на стандартном калибраторе они примерно совпадают, то при установке на образец могут не совпадать. Это обусловлено тем, что высокотемпературный экстензогра обычно имеет более сложную конструкцию и способ крепления на образце, больший вес, что влияет на точность его показаний. Поскольку датчик, используемый при комнатной температуре, является более точным, он предложен в качестве калибровочного. Разница в показаниях датчиков D_k и D_T в этих условиях испытаний не превышает 2%. Однако если она признана существенной, ее можно оценить и учесть.

Рассмотрим методические подходы к оценке указанных выше погрешностей при проведении экспериментальных работ по определению механических характеристик материала. Далее результаты испытаний при комнатной температуре ($T = 20^\circ\text{C}$) будем обозначать индексом 20, а при повышенных температурах – T .

Оценка погрешности результатов измерений деформации образца, вызванной несоосностью силовой цепочки. Несосоосность силовой цепочки испытательной машины схематически можно представить в виде эксцентрично закрепленного образца. В этом случае в нем под действием растягивающей нагрузки возникает деформация растяжения ε_p и изгиба ε_n .

Погрешность измерения деформации, обусловленной изгибом образца, определяется на основании его двукратного упругого нагружения при комнатной температуре. Для этого калибровочный экстензометр D_k устанавливается последовательно в двух противоположных положениях: I и II. Пусть в положении I деформация изгиба будет вычитаться из деформации растяжения:

$$\varepsilon_I = \varepsilon_p - \varepsilon_{и}, \quad (1)$$

тогда как в положении II они будут суммироваться:

$$\varepsilon_{II} = \varepsilon_p + \varepsilon_{и}. \quad (2)$$

Скорректированным значением $E_{ист}^k$ модуля упругости E в предположении, что упругие деформации вдоль оси образца не зависят от деформации изгиба [6], можно считать его среднее значение \bar{E} , определенное по полученным показаниям ε_i ($i = I, II$) экстензомера D_k :

$$E_{ист}^k = \bar{E} = (E_{II} + E_I)/2. \quad (3)$$

Отклонение деформации от ее среднего значения $\bar{\varepsilon}$ считается равным деформации изгиба $\varepsilon_{и}$. Тогда, определив среднее значение деформации $\bar{\varepsilon}$ по обоим показаниям экстензомера D_k , получим скорректированное значение деформации растяжения $\varepsilon_{ист}^k$ при комнатной температуре:

$$\varepsilon_{ист}^k = \bar{\varepsilon} = (\varepsilon_{II} + \varepsilon_I)/2 = (\varepsilon_p + \varepsilon_{и} + \varepsilon_p - \varepsilon_{и})/2 = \varepsilon_p. \quad (4)$$

Эти соображения положены в основу процедуры учета изгибной составляющей деформации образца с целью более точного определения модуля упругости.

По результатам измерений деформаций экстензометром D_k , установленным в положениях I и II при нагружении образца до уровня напряжений, не превышающих 2/3 предполагаемого предела пропорциональности материала, определяется величина составляющей деформации, вызванной изгибом образца, а силовая цепочка соответственно выравнивается. Такая операция повторяется до тех пор, пока отклонение показаний любого из экстензометров от среднего значения не будет превышать 2%. С практической точки зрения, принимая во внимание множество в принципе неустранимых приборных, измерительных и методологических погрешностей, которые здесь не рассматриваются и в совокупности составляют некий “шум”, такая точность может считаться достаточной. Следовательно, соосность силовой цепочки достигнута.

Испытания образцов при комнатной температуре до разрушения выполняются с использованием экстензомера D_k , установленного в положениях I и II. Скорректированные значения модуля упругости $E_{ист}^k$ определяются по формуле (3), а деформации растяжения $\varepsilon_{ист}^k$ – по формуле (4).

Определение погрешности измерений деформации образца высокотемпературным экстензометром при комнатной температуре. Перед испытанием образца в условиях повышенных температур предварительно необходимо оценить погрешность измерений при комнатной температуре высокотемпературным датчиком D_T и сравнить показания с калибровочным D_k . В этом случае по достижении соосности силовой цепочки выполняются последовательно нагружения образца с

фиксированием показаний экстензометра D_k , установленного в положениях I и II, а затем экстензометра D_T только в положении I. С помощью результатов этих испытаний по формуле (3) определяется среднее значение модуля упругости \bar{E} и значение E_{20} при комнатной температуре согласно показаниям экстензометра D_T , отношение которых определяет поправочный коэффициент K_1 :

$$K_1 = \bar{E}/E_{20}. \quad (5)$$

Далее предполагается, что величина K_1 сохраняется и при повышенных температурах.

Для учета рассматриваемой погрешности при обработке результатов испытаний образцов в случае повышенной температуры T проводится уточнение величин деформации ε_T и модуля упругости E_T , полученных непосредственно по показаниям датчика D_T , по формулам:

$$\varepsilon'_T = \varepsilon_T / K_1; \quad (6)$$

$$E'_T = E_T K_1. \quad (7)$$

Поскольку поправочный коэффициент K_1 (5) определяется с учетом влияния возможной несоосности силовой цепочки, можно считать, что он интегрально учитывает две вышеуказанные погрешности при определении рассматриваемых механических характеристик материала.

Определение погрешности показаний высокотемпературного экстензометра, зависящей от температуры испытаний. При испытаниях образцов в условиях повышенных температур вследствие нагрева высокотемпературного экстензометра возникает погрешность в его показаниях. Для ее определения проводятся эксперименты с так называемым “пустым” образцом при комнатной и повышенных температурах, представляющим собой разрезанный поперек образец или просто стержень, половинки которого закрепляются в захваты машины с зазором. На обе половинки как на целый образец устанавливается высокотемпературный экстензомер. В данном эксперименте экстензомер измеряет не деформацию ε , а перемещение L . На показания экстензомера, установленного на пустой образец, не может влиять составляющая деформации, вызванная изгибом образца, так как она отсутствует.

Одна из половинок образца перемещается штоком испытательной машины. Датчики его перемещения у современных машин обеспечивают точность измерения линейных величин не ниже, чем экстензометры. Кроме того, показания датчика штока не зависят от температуры.

При условии обеспечения в таком эксперименте надлежащей температурной стабильности элементов силовой цепочки вполне корректно точным датчиком перемещения штока поверить экстензомер.

Указанный эксперимент в общем случае повторяется для фиксированных значений температуры через равные ее промежутки, например для 100, 200, 300°C и т.д., до набора представительной статистики. Показания перемещения штока $L_{ист}$ принимаются за истинные и с ними сравниваются перемещения L_T высокотемпературного экстензомера.

Поправочные коэффициенты K_2 при каждой температуре можно определить как

$$K_2 = L_{ист}/L_T. \quad (8)$$

По результатам указанного эксперимента можно определить зависимость поправочного коэффициента K_2 от температуры испытаний T в заданном диапазоне ее изменения (рис. 1).

С учетом введенных поправочных коэффициентов скорректированная осевая деформация $\varepsilon_{ист}^k$ при заданной температуре испытания определяется по формуле

$$\varepsilon_{ист}^k = \varepsilon_T K_2 / K_1. \quad (9)$$

Величина скорректированной осевой деформации $\varepsilon_{ист}^k$ является расчетной для построения диаграммы деформирования и определения модуля упругости E при повышенной температуре с учетом вышерассмотренных погрешностей измерений.

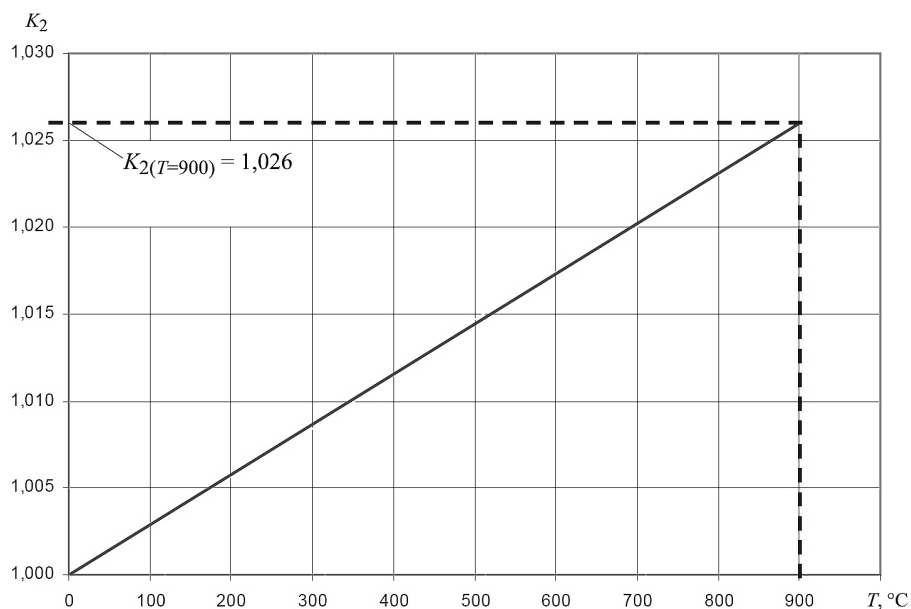


Рис. 1. Зависимость поправочного коэффициента K_2 от температуры по показаниям высокотемпературного экстензометра ($T = 900^\circ\text{C}$).

Таким образом, на основании изложенного можно сформулировать основные методические этапы обработки результатов измерения деформации при повышенной температуре по показаниям высокотемпературного экстензометра:

1) определение среднего $\bar{\varepsilon}$ или скорректированного $\varepsilon_{ист}^k$ значения деформации растяжения при комнатной температуре по формуле (4) с использованием показаний калибровочного экстензометра в положениях I и II;

2) определение деформации образца по формуле (6) с помощью поправочного коэффициента K_1 , учитывающего несоосность силовой схемы и погрешность показаний высокотемпературного экстензометра по сравнению с таковой калибровочного при комнатной температуре;

3) определение скорректированной осевой деформации $\varepsilon_{ист}^k$ по формуле (9) с учетом показаний высокотемпературного экстензометра при заданной температуре T ;

4) построение скорректированной диаграммы деформирования по значениям $\varepsilon_{ист}^k$ при данной температуре T и определение с ее помощью величин модуля упругости $E_{ист}^k$, предела текучести $\sigma_{0,2}^{(T)}$ и предела пропорциональности $\sigma_{пц}^{(T)}$.

Для учета поправки, обусловленной воздействием повышенных температур, достаточно с использованием приведенной на рис. 1 зависимости показания экстензометра D_T умножить на коэффициент K_2 , соответствующий температуре испытаний.

Результаты апробации рекомендаций. Применение предложенных рекомендаций проиллюстрируем на примере испытаний образцов сплава ЭИ962 (11Х11Н2В2МФ) на одноосное растяжение при температурах 20, 200, 300 и 400°C и определения модуля упругости E . Эксперименты выполнялись на современной универсальной сервогидравлической машине Instron 8802. Для измерения деформации образцов использовали штатные датчики осевой деформации разной конструкции: высокотемпературный экстензометр модели 2632-057 с керамическими ножами (экстензометр D_T), а в качестве калибровочного D_K – экстензометр модели 2620-603. Образцы нагревались в высокотемпературной печи Instron модели SF-1770. Использовался также калибровочный стенд Epsilon (США) модели 3590. На рис. 2 приведена схема установки высокотемпературного экстензометра на образце для испытаний.

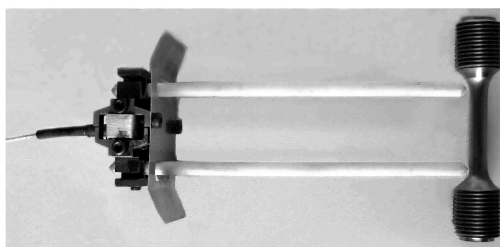


Рис. 2. Схема установки высокотемпературного экстензометра Instron модели 2632-057 с керамическими ножами на образце для испытаний.

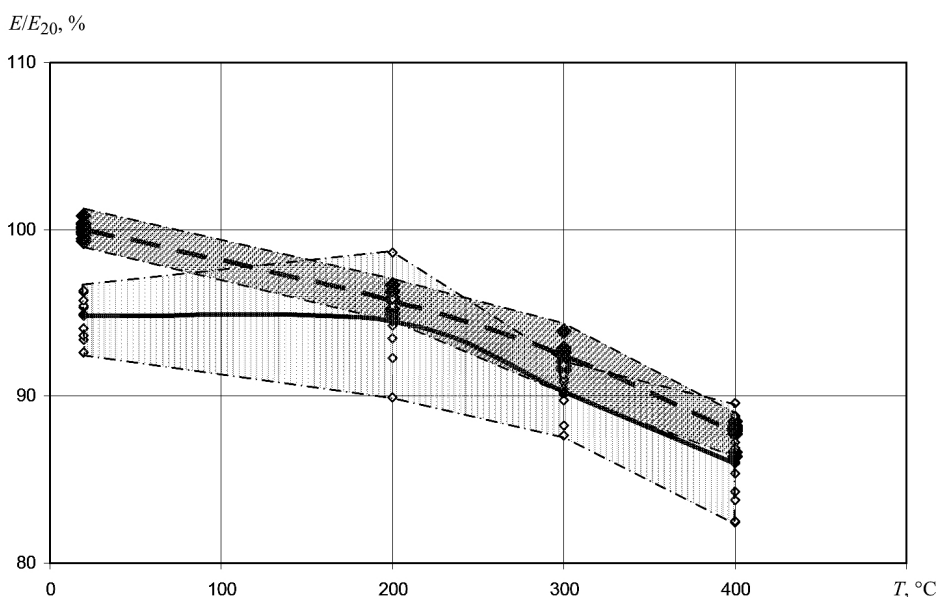


Рис. 3. Исходные (\diamond) и скорректированные (\blacklozenge) относительные значения модуля упругости E (сплошная линия), а также зависимость их средних значений от температуры испытания (штриховая линия) и разброс экспериментальных значений (штрихпунктирные линии).

Всего было испытано 48 образцов, по 12 при каждой температуре.

Поскольку в работе рассматриваются вопросы точности экспериментального определения механических характеристик, а не их конкретные значения, удобнее

оперировать относительной величиной. В качестве таковой вместо величины модуля упругости E вводится его отношение к среднему скорректированному значению модуля упругости E_{20} при комнатной температуре.

Относительные величины модуля упругости исследуемого материала, определенные по результатам испытаний образцов в выбранном диапазоне температур, а также после их корректировки в соответствии с предложенными рекомендациями, приведены на рис. 3. Там же представлены средние значения модуля упругости и их разброс до и после учета рассматриваемых погрешностей. Как видно, после учета погрешностей разброс значений модуля упругости существенно уменьшается. А поскольку в этом случае корректируется также диаграмма деформирования, соответственно уточняются также значения условного предела текучести $\sigma_{0,2}$ и предела пропорциональности $\sigma_{пц}$.

Выводы

1. Предложена методика определения механических характеристик материалов по результатам испытаний образцов на одноосное растяжение в условиях повышенных температур, которая позволяет учитывать погрешности измерения, возникающие при использовании датчиков деформации (экстензометров) современных испытательных систем вследствие несоосности их силовой цепочки и влияния температуры.

2. Апробация рекомендаций проиллюстрирована на примере определения модуля упругости образцов из сплава ЭИ962 (11X11H2B2MФ) при температурах 20, 200, 300 и 400°C.

3. Показано, что применение вышеописанной процедуры позволяет уменьшить разброс значений модуля упругости и скорректировать его значения таким образом, чтобы минимизировать влияние несоосности силовой цепочки, а также влияние погрешностей измерения самого экстензометра, включая и те, которые зависят от температуры испытания.

Резюме

Запропоновано методику визначення механічних характеристик матеріалів для сучасних авіаційних газотурбінних двигунів за результатами випробувань зразків на одноосовий розтяг в умовах підвищених температур. Методика дозволяє врахувати похибку вимірювання, що виникає при використанні датчика деформації сучасних випробувальних систем внаслідок неспіввісності силового ланцюжка і впливу температури. Апробування методики проілюстровано на прикладі одноосового розтягу зразків зі сталі EI962 (11X11H2B2MФ).

1. Палатиди Л. Б. Банк данных для ПД-14 // Двигатель. – 2013. – № 4 (88). – С. 10–11.
2. ГОСТ 1497-84. Металлы. Методы испытаний на растяжение. – Введ. 01.01.1986.
3. ДСТУ EN 10002-1:2006. Матеріали металеві. Випробування на розтяг. Ч. 1. Метод випробування за кімнатної температури. Ч. 5. Методи випробування за підвищеної температури. – Чинний від 01.07.2007.
4. ISO 6892-1:2009. Metallic Materials – Tensile Testing – Part 1: Method of Test at Room Temperature. – Publication date: 2009-08.
5. ASTM E8-04. Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials. – ASTM International, West Conshohocken, PA, 2004.
6. Сопротивление материалов / Под ред. Г. С. Писаренко. – Киев: Вища шк., 1986. – 260 с.

Поступила 16. 03. 2016