

УДК 539.374+376

*Б.В. Горев, В.А. Панамарев*

## **МЕТОД ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК ДЛЯ РАСЧЕТА ИЗГИБА ЭЛЕМЕНТОВ КОНСТРУКЦИЙ**

*B.V. Gorev<sup>1</sup>, V.A. Panamarev<sup>2</sup>*

<sup>1</sup> Lavrentyev Institute of Hydrodynamics SB RAS,  
15 Acad. Lavrentyev Ave., Novosibirsk, 630090, Russia.

<sup>2</sup> Siberian State Industrial University,  
42 Kirova St., Novokuznetsk, 654007, Russia.

## **THE INTEGRATED CHARACTERISTICS METHOD FOR CALCULATION OF A BEND OF DESIGN**

Обосновывается возможность использования интегральных характеристик на изгиб [1] для расчета процесса формоизменения и релаксации деталей постоянной и переменной толщины, оребренных панелей из листа и плит с поверхностями, близкими к разворачивающимся, из анизотропных разносопротивляющихся растяжению и сжатию сплавов при плоском напряженном состоянии в условиях ползучести. Приводится методика определения параметров функциональных зависимостей из обработки экспериментальных диаграмм на чистый изгиб прямоугольных балок и кручение квадратных пластин для расчета процесса изгиба пластин с использованием соотношений, связывающих скорости изменения кривизны с моментами для ортотропных материалов в предположении равенства свойств ползучести на растяжение и сжатие [2].

**МЕТОД ИНТЕГРАЛЬНЫХ ХАРАКТЕРИСТИК, ФОРМООБРАЗОВАНИЕ, РЕЖИМ ПОЛЗУЧЕСТИ, ИЗГИБ, ОДИНАРНАЯ И ДВОЙНАЯ КРИВИЗНА. ПЛОСКОЕ НАПРЯЖЕННОЕ СОСТОЯНИЕ.**

Possibility of use of integrated characteristics on a bend [1] for calculation of forming process and relaxations of details with a constant thickness from sheet and plates having surfaces close to developable from anisotropic alloys with different resistance to a stretching and compression at a flat stress state in the creep conditions is proved. The technique of definition of functional dependences parameters from processing of experimental diagrams on a pure bend of rectangular beams and torsion of square plates for calculation process of plates bending with use of the relationship between rates of change curvature and the moments for orthotropic materials in the assumption of identical properties on a stretching and compression is spent [2].

**INTEGRATED CHARACTERISTICS METHOD, FORMING, CREEP, BENDING, SINGLE AND DOUBLE CURVATURES, FLAT STRESS STATE.**

Принятая в авиа- и судостроении, а также в машиностроении ориентация на проектирование изделий с меньшим количеством комплектующих деталей приводит

к более широкому использованию крупногабаритных, цельнофрезерованных из плит, монолитных гладких и оребренных панелей, деталей из листа, фасонных профилей



(стрингеров, шпангоутов) из высокопрочных алюминиевых и титановых сплавов.

Процессы формообразования деталей со сложными аэро- и гидродинамическими поверхностями, размеры которых достигают десяти и более метров, исследованы недостаточно. По-видимому, это обусловлено тем, что расчет таких процессов в трехмерной постановке представляет собой сложную задачу даже при использовании современной компьютерной техники [3 – 5]. Кроме того, деформационно-прочностные характеристики материала, необходимые для проведения расчета на ползучесть, зачастую приходится определять непосредственно из элементов конструкций изделия. При этом свойства ползучести, определенные из экспериментов, которые проводятся на образцах, изготовленных из листов, плит, толстостенных прессованных заготовок в состоянии поставки, существенно отличаются от свойств тех же материалов, но полученных из тонкостенных заготовок, цельнотянутых профилей, оребренных панелей и т. п. Более того, деформационно-прочностные свойства ползучести современных конструкционных алюминиевых и титановых сплавов существенно зависят от толщины листов и плит, направления вырезки заготовок для изготовления образцов и знака прикладываемой нагрузки при проведении испытаний [6, 7].

Необходимость учета реальных свойств ползучести для оценки процесса формообразования показана на примерах чистого изгиба тонких анизотропных пластин одинарной и двойной кривизны в предположении одинаковости свойств на растяжение и сжатие. Результаты расчета «по установившейся стадии» процессов деформирования для анизотропных материалов, по сравнению с таковыми в изотропной постановке без учета анизотропии, могут отличаться на порядок и более [7]. Неучет разносопротивляемости сплавов при ползучести еще больше увеличивает ошибку, приводит к большим погрешностям при оценке израсходованного эксплуатационного ресурса на стадии изготовления и при расчетах на длительную прочность и живучесть [8, 9].

Следует отметить, что изготовить образцы на сжатие из тонкостенных элементов деталей, из листов и тонких плит, в соответствии с ГОСТом не всегда возможно, и вопрос определения характеристик на сжатие остается открытым.

Из сказанного выше применительно к деталям больших габаритов следует необходимость разработки как приближенных (инженерных) методов расчета, так и методик получения характеристик материала с учетом конструктивных особенностей изготавливаемых деталей. Учитывая тот факт, что большая номенклатура крупногабаритных деталей в авиа- и судостроении формообразуется в условиях, близких к чистому изгибу, для проведения соответствующих вычислений в данной статье экспериментально обосновывается упрощенная методика определения интегральных характеристик на изгиб для расчета процесса формообразования элементов конструкций одинарной и двойной (в том числе знакопеременной) кривизны в режиме ползучести.

Возможность использования изгибных характеристик при плоском напряженно-деформированном состоянии для формообразования трансверсально-изотропных пластин из разносопротивляющихся растяжению и сжатию материалов при ползучести в развертывающие (близкие к чистому изгибу) поверхности проиллюстрирована сведением к расчету по общепринятым соотношениям [1, 2], связывающим скорости изменения кривизн с изгибающими и крутящими моментами для ортотропных алюминиевого В95пчТ2 (плита толщиной 8,7 мм) и титанового ВТ-20 (толщина плиты 25 мм) сплавов. Изгибные характеристики при температуре в продольном и поперечном направлениях определялись из чистого изгиба балок прямоугольного сечения под действием постоянных изгибающих моментов напряжениями, не превосходящими предела упругости материала. Характеристику относительного кручения срединной поверхности получали из экспериментальных данных на скручивание квадратной пластины постоянным крутящим моментом по четырехточечной схеме при-

ложения нагрузки в углах пластины [10].

Апробация полученных изгибных характеристик проведена путем сравнения экспериментальных данных с расчетными по релаксации интенсивностей моментов при скручивании квадратных пластин. Получено вполне удовлетворительное совпадение расчетных и экспериментальных данных.

**Метод интегральных характеристик на изгиб**

Для одинаково работающих на растяжение и сжатие материалов в условиях ползучести, подчиняющихся степенному закону деформирования, геометрия для различных размеров и форм сечения образцов при изгибе отделяется делением изгибающего момента  $M$  на обобщенный момент инерции сечения при ползучести [11, с. 804]:

$$J_0 = \int_F |z|^{(n+1)/n} dF, \tag{1}$$

где  $n$  – показатель ползучести;  $z$  – координата по высоте сечения профиля,  $F$  – площадь сечения образца.

Для материалов с упрочнением обобщенный момент инерции сечения при ползучести следует выяснять по формуле

$$J_0 = \int_F |z|^{(\alpha+n+1)/n} dF, \tag{2}$$

где  $\alpha$  – показатель упрочнения материала.

При этом зависимость скорости изменения кривизны  $\dot{\varepsilon}$  является универсальной для различных форм сечений:

$$\dot{\varepsilon} = B(M / J_0)^n. \tag{3}$$

В настоящей работе использованы соотношения (1), (2) для неупрочняющихся и упрочняющихся материалов соответственно. Почти полное совпадение экспериментальных значений кривизны (рис. 1) при изгибе балок одинакового сечения с асимметрией относительно нейтральной оси (тавры, изготовленные из разносопротивляющихся растяжению и сжатию сплавов на основе алюминия и титана [12, 13] равными, но противоположно направленными моментами, позволило в первом приближении отделять геометрию таким же образом, как и для одинаково работающих на растяжение и сжатие материалов.

На рис. 1, а показаны диаграммы изменения кривизны во времени  $\varepsilon = \varepsilon(t)$  при изгибе тавровой балки, когда полка работает на растяжение и на сжатие. Для сплава АМГ-3 (пруток диаметром 28 мм) при температуре испытаний 200 °С и изгибающем моменте  $M = 88,3$  Н·м. Различие свойств ползучести на растяжение и сжатие по скоростям деформаций достигает одного по-

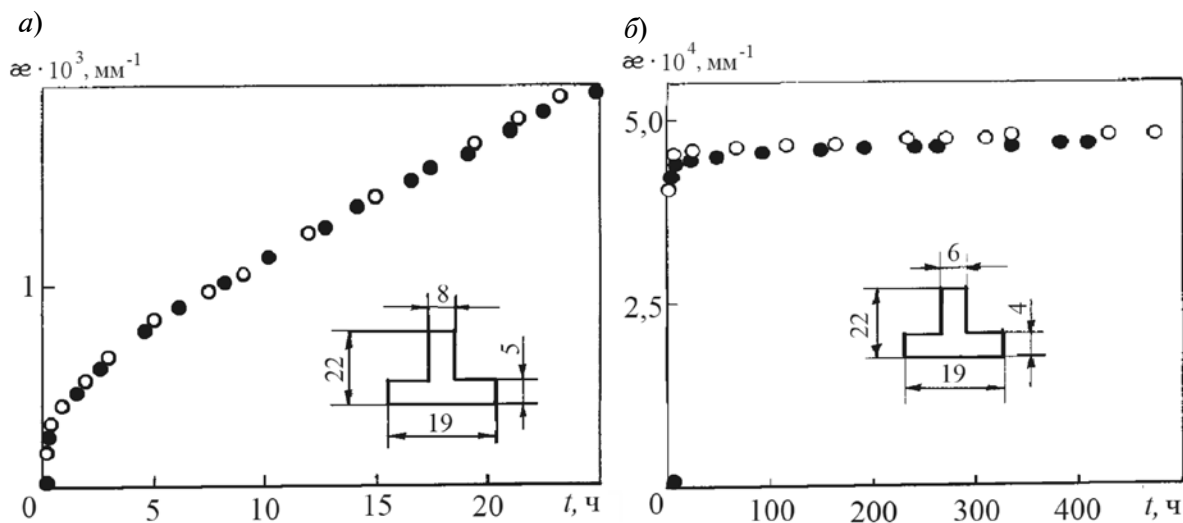


Рис. 1. Экспериментальные диаграммы изменения значений кривизны при изгибе тавровых балок, изготовленных из сплавов АМГ-3 (а) и 17 (б), под действием постоянных значений момента  $M$ . Получены при  $T = 200$  °С,  $M = 88,3$  Н·м (а) и  $T = 20$  °С,  $M = 441$  Н·м (б), для случаев, когда полка работает на растяжение (светлые точки) и на сжатие (темные точки). Показаны геометрические размеры сечения образцов

рядка при одинаковых напряжениях [13].

На рис. 1, б приведены аналогичные экспериментальные данные по изгибу тавровых балок из титанового сплава 17 (Ti-6Al-4V), сильно разнсопротивляющегося в условиях ползучести. Испытывались образцы из плиты толщиной 60 мм, температура испытаний – 20 °С,  $M = 441$  Н·м. Свойства ползучести на растяжение и сжатие различаются на несколько порядков по скоростям деформаций [12].

Совпадение экспериментальных и расчетных данных для крайних случаев изгиба балок резко несимметрического сечения (изгиб в одну и в противоположную стороны тавров равного поперечного сечения) свидетельствует о возможности определения интегральных свойств из изгиба балок независимо от формы сечения образца. Более того, это утверждение подкрепляется аналогичным сопоставлением экспериментальных данных при знакопеременном изгибе балок таврового сечения на указанных выше сплавах.

Отсутствие влияния геометрии сечения образца на интегральные характеристики при изгибе проверялось также серией экспериментов на сплаве АМГ-3 под действием постоянного момента для балок с различной формой сечений (квадрат, прямоугольник, круг, полукруг). Однако следует подчеркнуть, что, отделяя геометрию таким же образом, как и для одинаково работающих на растяжение и сжатие материалов, мы сознательно идем на погрешность, которая обусловлена тем, что мы пренебрегаем смещением нейтральной оси балки из-за разнсопротивляемости материала. Погрешность для исследованного сплава не превышала 25 %. Определение изгибных характеристик на балках произвольных форм и размеров (в разумных пределах) дает технически приемлемую точность [1].

Таким образом, для материалов с разными свойствами ползучести на растяжение и сжатие, как и для материалов, одинаково работающих на указанный вид деформации, можно определять изгибные характеристики на каком-либо из профилей и применять их к расчету на ползучесть балок других сечений.

### Определение сдвиговой характеристики

Возможность использования изгибных характеристик для расчета на ползучесть чистого изгиба в развертывающие поверхности (в том числе двойкой кривизны) деталей из листа, пластин и плит проиллюстрируем на примере титанового сплава ВТ-20 (плита толщиной 25 мм) при температуре 750 °С и алюминиевого сплава В95пчТ2 (плита толщиной 8,7 мм) при температуре 180 °С. Для сведения расчета на ползучесть изгиба деталей при плоском напряженно-деформированном состоянии из разнсопротивляющегося при ползучести материала к расчету по общепринятым соотношениям, связывающим скорости изменения кривизн с моментами для изотропных материалов [14, с. 526], и по аналогии с ортотропными материалами, справедлива формула [2]:

$$\dot{\varepsilon}_{ij} = \frac{\partial \Phi(M_0)}{\partial M_{ij}},$$

$$\Phi = \frac{1}{n+1} \left[ \frac{2nh^{(2n+1)/n}}{2n+1} \right]^n M_0^{(n+1)/2}; \quad (4)$$

$$M_0^2 = (A_{22} + A_{33})M_{11}^2 + (A_{11} + A_{33})M_{22}^2 - 2A_{33}M_{11}M_{22} + 2A_{12}M_{12}^2, \quad (5)$$

где  $\dot{\varepsilon}_i$  – компоненты тензора скоростей изменения кривизн;  $M_{ij}$  – компоненты тензора моментов;  $h$  – толщина пластины;  $A_{ij}$  – компоненты анизотропии.

Кроме изгибных характеристик в продольном и поперечном направлениях, необходимо определить характеристики на сдвиг. Сдвиговую деформацию (относительное кручение срединной поверхности) можно получить из экспериментальных данных по скручиванию квадратной пластины постоянным крутящим моментом  $M_{12}$  по четырехточечной схеме приложения нагрузки путем замены горизонтальных касательных напряжений, непрерывно распределенных по краям, вертикальными сосредоточенными силами в углах пластины [10, с. 58].

Для определения характеристики относительного кручения срединной поверхности заготовки была сконструирована и изготовлена лабораторная установка для

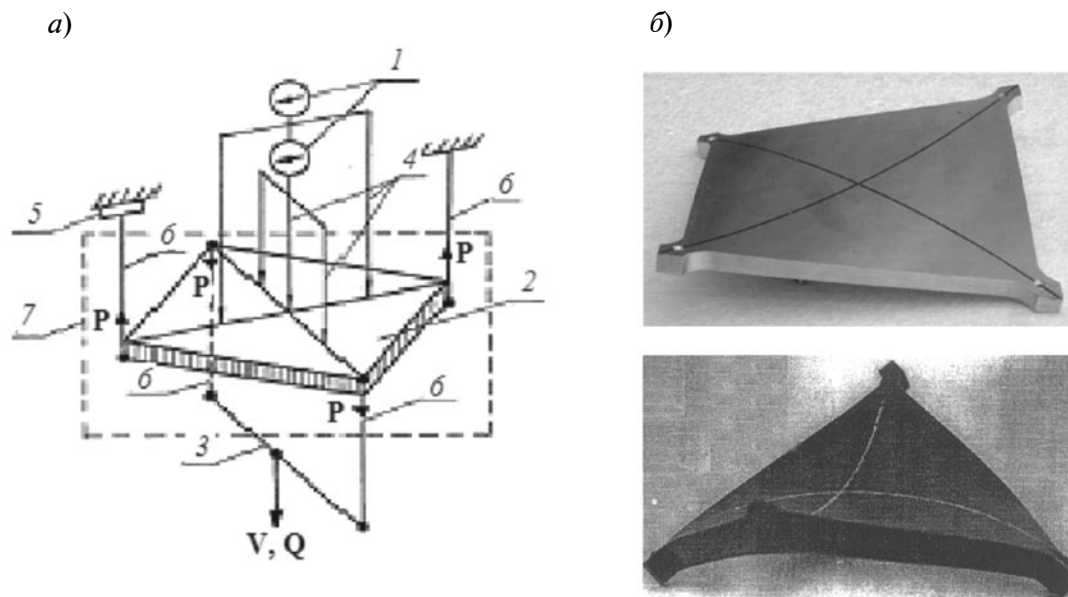


Рис. 2. Кинематическая схема установки для кручения квадратных пластин (а) и фотографии образцов скрученных пластин (верхняя – В950сТ1, нижняя – сплав 17) (б).

Позиции на рис. 2, а: 1 – индикаторы; 2 – образец в виде квадратной пластины; 3 – траверса; 4 – кварцевые стержни замера; 5 – датчик силоизмерительный тензорезисторный (ДСТ) для измерения нагрузки; 6 – захваты; 7 – печное пространство; P – сила, прикладываемая по углам пластины, Q – груз, V – скорость перемещения траверсы 3

скручивания квадратной пластины постоянным крутящим моментом  $M_{12}$  по четырехточечной схеме приложения нагрузки.

На рис. 2, а приведена кинематическая схема установки для осуществления чистого кручения квадратной пластины, а также даны схемы нагружения. Установка позволяет, кроме реализации процесса ползучести постоянным крутящим моментом, снимать диаграммы с заданными скоростями изменения кривизны (прогиба  $\delta$ ) и осуществлять релаксацию крутящего момента. Измерение прогиба осуществляется по диагоналям индикаторами 1, кривизна насчитывается в соответствии с гипотезой прямых нормалей для чистого изгиба пластин по формуле  $\alpha = 8\delta / l_0^2$ ; где  $l_0$  – база замера. Пластина 2 (см. также рис. 2, б) изгибается в развертывающуюся седлообразную поверхность (одна диагональ деформируется выпуклостью вверх, другая – выпуклостью вниз). Сила P прикладывается по углам пластины и составляет величину  $P = 2M_{12}$ . На траверсу 3 можно подвешивать груз Q для реализации постоянного крутящего момента, либо с той же целью ее можно перемещать по

вертикали с заданной скоростью V.

На рис. 3, а приведены экспериментальные диаграммы изменения кривизны во времени при чистом изгибе балок (ширина – 10 мм, высота – 20 мм, длина – 200 мм), вырезанных в поперечном направлении, под действием различных постоянных единичных изгибающих моментов  $M_{22}$ , при температуре 750 °С, для титанового сплава ВТ-20.

На рис. 3, б приведены аналогичные экспериментальные данные на чистое кручение квадратных пластин размером 200×200 мм и толщиной 25 мм с различными постоянными единичными интенсивностями моментов  $M_i$ . Кривизна, так же как и для балок, рассчитывалась по формуле  $\alpha = 8\delta / l_0^2$ ; величина прогибов  $\delta$  определялась по двум диагоналям на базе замера  $l_0 = 100$  мм и затем усреднялась. После обработки экспериментальных данных на чистый изгиб балок в координатах  $\ln \alpha - \ln (M/J_0)$  получены следующие значения коэффициентов для степенного закона ползучести:

$$B_0 = 8,89 \cdot 10^{-10} (\text{МПа})^{-n} / \text{с}; n = 2,5 \quad (6)$$

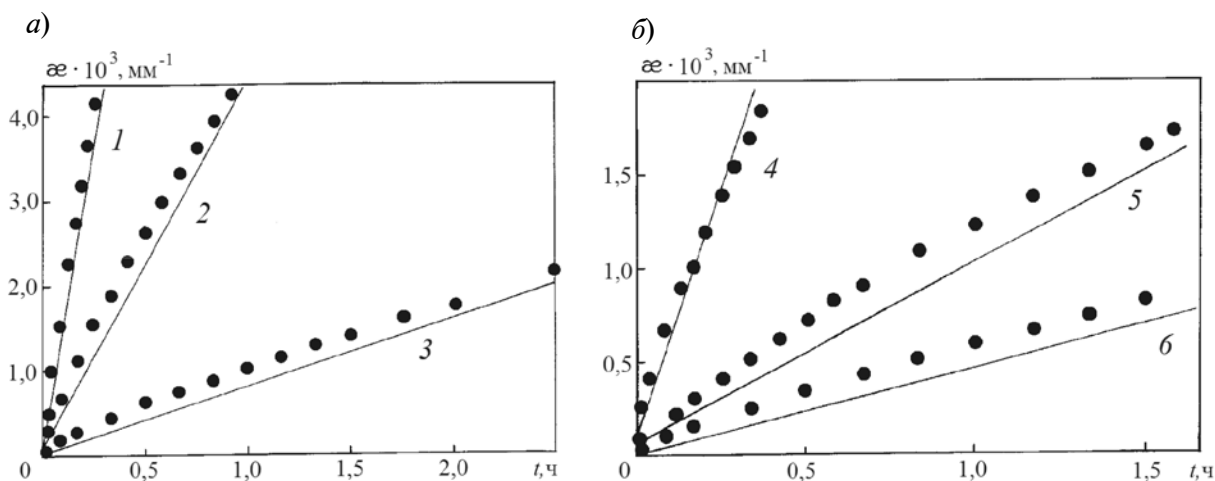


Рис. 3. Экспериментальные (точки) и расчетные (линии) диаграммы изменения во времени кривизны при чистом изгибе прямоугольных балок (а) и чистом кручении квадратных пластин (б) под действием различных постоянных единичных интенсивностей моментов, Н·м/м:  $M_{22} = 6,11$  (1), 4,10 (2), 2,07 (3);  $M_i = 5,93$  (4), 2,94(5), 2,22 (6);  $T = 750$  °С. Образцы сплава ВТ-20 имели размеры  $200 \times 10 \times 20$  мм (а) и  $200 \times 200 \times 25$  мм (б)

(модуль упругости равен 31,5 ГПа).

При испытаниях балок на изгиб установлено, что в продольном, поперечном и под углом 45° к направлению проката, при одном и том же значении действующего момента, скорости изменения кривизны практически совпадают, т. е. в плоскости плиты материал изотропный. О том же свидетельствуют и экспериментальные данные, полученные при испытаниях на чистое кручение пластин. При использовании степенной зависимости интенсивности скоростей изменения величин кривизны от интенсивности моментов  $M_i$  [13], которая выражается как

$$\dot{\alpha}_i = \frac{B_0}{n+1} \left[ \frac{2nh^{(2n+1)/n}}{2n+1} \right]^{-n} M_i^{(n+1)/2}, \quad (7)$$

коэффициент ползучести на кручение и показатель ползучести практически совпали с таковыми на изгиб (см. характеристики (6)).

На рис. 3, а, б показана аппроксимация степенной зависимостью экспериментальных данных на изгиб и кручение, соответственно с использованием характеристик (6).

Апробация полученных характеристик проведена путем сравнения экспериментальных данных с расчетными по релаксации интенсивности моментов при кручении. На рис. 4 представлены экспериментальные

данные по релаксации и результаты расчета для двух пластин толщиной  $h = 25$  и 17 мм. Там же показана кинематическая схема кручения пластин силами, сосредоточенными в вершинах углов, для определения характеристик на сдвиг.

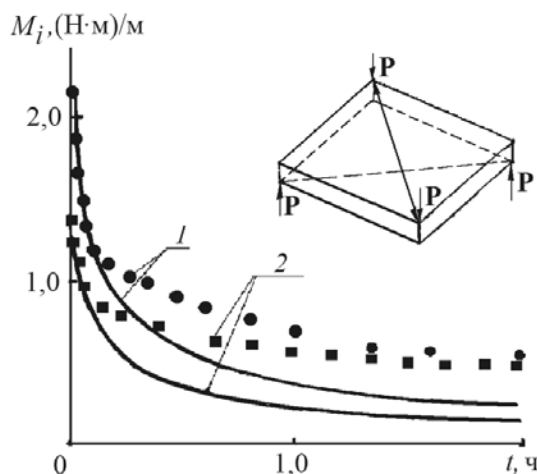


Рис. 4. Сравнение экспериментальных данных (точки) с расчетными (линии) по релаксации интенсивности моментов при кручении двух квадратных пластин разной толщины  $h$ , мм: 25 (1) и 17 (2).

Сплав ВТ-20, толщина плиты 25 мм,  $T = 750$  °С. Представлена также кинематическая схема кручения силами P

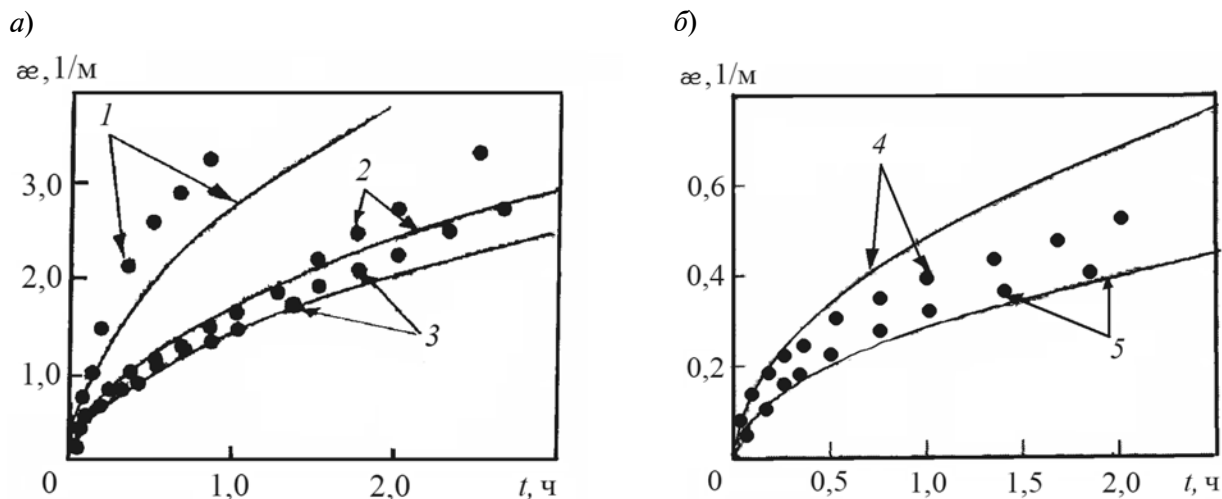


Рис. 5. Экспериментальные (точки) и расчетные (линии) диаграммы изменения во времени кривизны при чистом изгибе прямоугольных балок (а) и чистом кручении квадратных пластин (б) под действием различных постоянных единичных интенсивностей моментов, Н·м/м:  
 $M = 4458$  (1), 3980 (2), 3821 (3);  $M_i = 2972$  (4), 2620 (5).  $T = 180$  °С.  
 Образцы сплава В95пчТ2 имели размеры  $200 \times 20 \times 8,0$  мм (а) и  $180 \times 180 \times 8,2$  мм (б)

Определение характеристик на сдвиг по предложенной методике для монолитных панелей, усиленных с одной стороны системой ребер, не представляется возможным. Вместе с тем использование изгибных характеристик при расчете на ползучесть подкрепленных панелей одинарной кривизны (случай отсутствия кручения) позволяет существенно упростить процедуру, проводимую по ранее предложенной инженерной методике [15, 16]. Знание интегральных характеристик на изгиб позволяет снизить размерность задачи (так как не требуется искать перераспределение напряжений от времени по толщине пластины при изгибе) и проводить расчеты крупногабаритных деталей без использования метода конечных элементов.

На рис. 5, а представлены аналогичные результаты экспериментов на ползучесть при чистом изгибе балок, изготовленных вдоль проката из алюминиевого сплава В95пчТ2 (плита толщиной 8,7 мм), под действием различных постоянных единичных внешних моментов при температуре 180 °С. Аппроксимации были проведены степенной зависимостью скорости изменения кривизны от изгибающего единичного момента по теории упрочнения

$$\dot{\kappa}_{ij} = BM^n / \kappa^\alpha;$$

$$B = 5,5 \cdot 10^{-39} (\text{Н} \cdot \text{м} / \text{м})^{-n} \text{м}^{-\alpha} \text{с}^{-1};$$

$$n = 8,57; \alpha = 1.$$

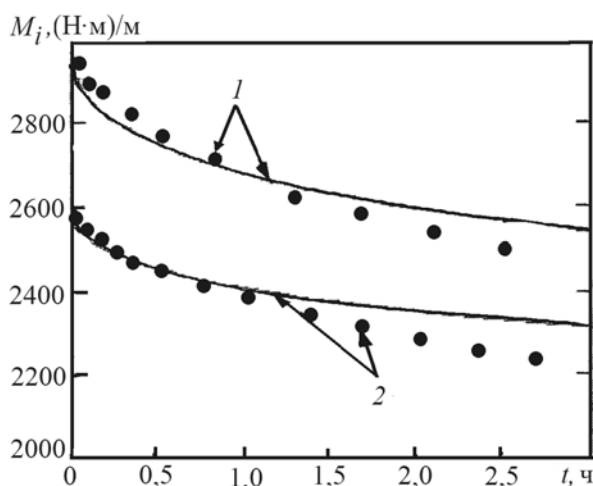


Рис. 6. Сравнение экспериментальных данных (точки) с расчетными (линии) по релаксации интенсивности моментов при кручении квадратных пластин ( $h = 8,2$  мм) с различными постоянными единичными интенсивностями моментов в начальный момент времени  $M_i(0)$ , Н·м/м: 2972 (1) и 2620 (2). Сплав В95пчТ2,  $T = 180$  °С

На рис. 5, б представлены аналогичные результаты по скручиванию двух квадратных пластин размером 180×180 мм и толщиной 8,2 мм. Достаточно удовлетворительное совпадение результатов эксперимента с расчетными данными при использовании одних и тех же характеристик для изгиба балок и кручения пластин говорит о трансверсальной анизотропии плиты (изотропия в плоскости листа).

Апробация полученных характеристик была проведена путем сравнения экспериментальных данных с расчетными (рис. 6) по релаксации интенсивности моментов при кручении пластин из сплава В95пчТ2 при  $T = 180\text{ }^\circ\text{C}$  (толщина пластин  $h = 8,2\text{ мм}$ ).

Таким образом, для тонколистовых сплавов, когда невозможно определение

свойств ползучести на сжатие в соответствии с ГОСТом, интегральные характеристики (включая характеристику относительного кручения срединной поверхности) позволяют рассчитывать при задании процесса нагружения и в кинематической постановке упреждающую геометрию оснастки с учетом упругого восстановления (распружинивания) и являются паспортными для расчета процесса формообразования. На основании кривых релаксации определяется рациональное время выдержки заготовки в заневоленном состоянии, при котором необратимые деформации ползучести достигнут максимальной величины, тем самым распружинивание заготовки будет минимальным.

Работа выполнена при поддержке гранта РФФИ (проект № 11-08-00845-а).

#### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. **Горев, Б.В.** К обоснованию метода изгибных характеристик для расчета на ползучесть изгиба элементов конструкций [Текст] / Б.В. Горев // Сб. научн. тр. «Динамика сплошной среды». – Новосибирск: Изд. Ин-та гидродинамики им. Лаврентьева СО РАН, 2001. – Вып. 119. – С. 36–42.
2. **Соснин, О.В.** О некоторых особенностях ползучести листовых материалов [Текст] / О.В. Соснин, Б.В. Горев // Сб. науч. тр. «Динамика сплошной среды». – Новосибирск: Изд. Ин-та гидродинамики им. Лаврентьева СО РАН, 1970. – Вып. 4. – С. 5–10.
3. **Коробейников, С.Н.** Математическое моделирование процессов ползучести металлических изделий из материалов, имеющих разные свойства при растяжении и сжатии [Текст] / С.Н. Коробейников, А.И. Олейников, Б.В. Горев, К.С. Бормотин // Вычислительные методы и программирование. – 2008. – Т. 9. – С. 346–365.
4. **Горев, Б.В.** К расчету процесса деформирования листовых деталей двойной кривизны из сплавов с разными свойствами на растяжение и сжатие в условиях ползучести [Текст] / Б.В. Горев, И.А. Банщикова, А.И. Олейников, А.И. Пекарш // Матер. XII Междунар. симп. «Динамические и технологические проблемы механики конструкций и сплошных сред». – М.: Изд-во МАИ, 2006. – С. 41–43.
5. **Банщикова, И.А.** О ползучести пластин из алюминиевых сплавов при изгибе [Текст] / И.А. Банщикова, Б.В. Горев, И.Ю. Цвелодуб // Прикладная механика и техническая физика. – 2007. – Т. 48. – № 5. – С. 156–159.
6. **Горев, Б.В.** Особенности деформирования листов и плит из алюминиевых сплавов в режиме ползучести [Текст] / Б.В. Горев, И.Ж. Масанов // Технология машиностроения. – 2009. – № 7. – С. 13–20.
7. **Горев, Б.В.** Технологические процессы обработки металлов давлением в режимах ползучести и их моделирование [Текст] / Б.В. Горев, О.В. Соснин // Тр. Междунар. научн.-техн. конф. СМТТ. – СПб, 2009. – С. 257–269.
8. **Горев, Б.В.** К описанию ниспадающего участка кривой деформирования «напряжение – деформация» по кинетическим уравнениям со скалярным параметром поврежденности / Б.В. Горев, И.А. Банщикова // Вестник Самарского гос. техн. ун-та. Сер. Физико-математические науки. – 2008. – № 2 (17). – С. 110–117.
9. **Горев, Б.В.** К использованию определяющих уравнений в энергетической форме для оценки живучести и разрушения элементов конструкций [Текст] / Б.В. Горев, И.А. Банщикова // Тр. VII Всерос. научн. конф. с междунар. участием. – Ч. 1. Математические модели механики, прочности и надежности элементов конструкций. – Самара: СамГТУ, 2010. – С. 109–112.
10. **Тимошенко, С.П.** Пластинки и оболочки [Текст] / С.П. Тимошенко, С. Войновский-Кригер. – М.: Физматгиз, 1963. – 636 с.
11. Основы современных методов расчета на прочность в машиностроении. Расчет при динамической нагрузке. Устойчивость. Ползучесть



[Текст] / Под ред. С.Д. Панамарева. – М.: Машгиз, 1952. – 862 с.

12. **Никитенко, А.Ф.** О прочностных особенностях титановых сплавов [Текст] / А.Ф. Никитенко, О.В. Соснин, Н.Г. Торшенов, И.К. Шокало // Прикладная механика и техническая физика. – 1976. – № 6. – С. 118–122.

13. **Соснин, О.В.** О ползучести материалов с разными характеристиками на растяжение и сжатие [Текст] / О.В. Соснин // Прикладная механика и техническая физика. – 1970. – № 5. – С. 136–139.

14. **Работнов, Ю.Н.** Механика деформи-

руемого твердого тела [Текст] / Ю.Н. Работнов. – М.: Наука, 1988. – 752 с.

15. **Горев, Б.В.** К вопросу обработки материалов давлением в режиме ползучести [Текст] / Б.В. Горев, И.Д. Клопотов, Г.А. Раевская, О.В. Соснин // Прикладная механика и техническая физика. – 1980. – № 5. – С. 185–191.

16. **Сотников, В.С.** Формообразование вадельных панелей из сплава АК4-1 в режимах ползучести [Текст] / В.С. Сотников, Б.В. Горев, О.В. Соснин [и др.] // Руководящий технический материал (РТМ-1.4.988-81). – М.: НИАТ, 1983. – 44 с.

## REFERENCES

1. **Gorev B.V.** K obosnovaniju metoda izgibnyh karakteristik dlja rascheta na polzuchest' izgiba jelementov konstrukcij. Sb. nauchn. tr. «Dinamika sploshnoj sredy», Novosibirsk: Izd. In-ta gidrodinamiki im. Lavrent'eva SO RAN, 2001, Vol. 119, pp. 36–42. (rus)

2. **Sosnin O.V., Gorev B.V.** O nekotoryh osobennostjah polzuchesti listovyh materialov. Sb. nauch. tr. «Dinamika sploshnoj sredy», Novosibirsk: Izd. In-ta gidrodinamiki im. Lavrent'eva SO RAN, 1970, Vol. 4, pp. 5–10. (rus)

3. **Korobeynikov S.N., Oleynikov A.I., Gorev B.V., Bormotin K.S.** Matematicheskoe modelirovanie processov polzuchesti metallicheskih izdelij iz materialov, imejushhих raznye svojstva pri rastjazhenii i szhatii. *Vychislitel'nye metody i programirovanie*, 2008, Vol. 9, pp. 346–365. (rus)

4. **Gorev B.V., Banshnikova I.A., Olejnikov A.I., Pekarsh A.I.** K raschetu processa deformirovanija listovyh detalej dvojnoj krivizny iz splavov s raznymi svojstvami na rastjazhenie i szhatie v uslovijah polzuchesti. Mater. XII Mezhdunar. simp. «Dinamicheskie i tehnologicheskie problemy mehaniki konstrukcij i sploshnyh sred». Moscow, Izd-vo MAI, 2006, pp. 41–43. (rus)

5. **Banshnikova I.A., Gorev B.V., Tselodub I.Yu.** O polzuchesti plastin iz aljuminievых splavov pri izgibe, *Prikladnaja mehanika i tehničeskaja fizika*, 2007, Vol. 48, № 5, pp. 156–159. (rus)

6. **Gorev B.V., Masanov I.Zh.** Osobennosti deformirovanija listov i plit iz aljuminievых splavov v rezhime polzuchesti, *Tehnologija mashinostroenija*, 2009, № 7, pp. 13–20. (rus)

7. **Gorev B.V., Sosnin O.V.** Tehnologicheskie processy obrabotki metallov davleniem v rezhimah polzuchesti i ih modelirovanie. Tr. Mezhdunar. nauchn.-tehn. konf. SMTT, SPb, 2009, pp. 257–269. (rus)

8. **Gorev B.V., Banshnikova I.A.** K opisaniu nispadajushhego uchastka krivoj deformirovanija

«naprjazhenie – deformacija» po kineticheskim uravnenijam so skaljarnym parametrom povrezhdennosti. *Vestnik Samarskogo gos. tehn. un-ta. Ser. Fiziko-matematicheskie nauki*, 2008, № 2 (17), pp. 110–117. (rus)

9. **Gorev B.V., Banshnikova I.A.** K ispol'zovaniju opredelajushhих uravnenij v jenergeticheskoj forme dlja ocenki zhivuchesti i razrushenija jelementov konstrukcij. Tr. VII Vserossijskoj nauchn. konf. s mezhdunar. uchastiem, Ch. 1. Matematicheskie modeli mehaniki, prochnosti i nadezhnosti jelementov konstrukcij, Samara: SamGTU, 2010, pp. 109–112. (rus)

10. **Timoshenko S.P., Voynovskij-Kruger S.** *Plastinki i obolochki*. Moscow, Fizmatgiz, 1963, 636 p. (rus)

11. *Osnovy sovremennyh metodov rascheta na prochnost' v mashinostroenii. Raschet pri dinamicheskoj nagruzke. Ustojchivost'. Polzuchest'.* Edited by S.D. Panamarev. Moscow, Mashgiz, 1952, 862 p. (rus)

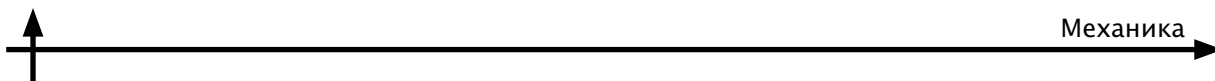
12. **Nikitenko A.F., Sosnin O.V., Torshenov N.G., Shokalo I.K.** O prochnostnyh osobennostjah titanovyh splavov. *Prikladnaja mehanika i tehničeskaja fizika*, 1976, № 6, pp. 118–122. (rus)

13. **Sosnin O.V.** O polzuchesti materialov s raznymi karakteristikami na rastjazhenie i szhatie. *Prikladnaja mehanika i tehničeskaja fizika*, 1970, № 5, pp. 136–139. (rus)

14. **Rabotnov Yu.N.** *Mehanika deformiruemogo tverdogo tela*. Moscow, Nauka, 1988, 752 p. (rus)

15. **Gorev B.V., Klopotov I.D., Raevskaya G.A., Sosnin O.V.** K voprosu obrabotki materialov davleniem v rezhime polzuchesti. *Prikladnaja mehanika i tehničeskaja fizika*, 1980, № 5, pp. 185–191. (rus)

16. **Sotnikov V.S., Gorev B.V., Sosnin O.V. et al.** Формообразование вадельных панелей из сплава АК4-1 в режимилах ползучести. Рукководиашhij tehničeskij material (РТМ-1.4.988-81). Moscow, NIAT, 1983, 44 p. (rus)



**ГОРЕВ Борис Васильевич** – доктор технических наук, ведущий научный сотрудник *Института гидродинамики им. М.А. Лаврентьева СО РАН.*

630090, г. Новосибирск, пр. Ак. Лаврентьева, 15  
gorevbv@yandex.ru

**ПАНАМАРЕВ Виктор Александрович** – кандидат физико-математических наук, доцент кафедры *высшей математики Сибирского государственного индустриального университета.*

654007, г. Новокузнецк, ул. Кирова, 42  
panva@qde.ru