

УДК 621.7.073:620.22

С.М. ЧУБЧЕНКО, М.А. ШЕВЦОВА

Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского “ХАИ”, Украина

ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТОНКОЛИСТОВОЙ ОСНАСТКИ С ЗАДАНЫМ РЕСУРСОМ ДЛЯ ФОРМОВАНИЯ ИЗДЕЛИЙ ИЗ КОМПОЗИЦИОННЫХ МАТЕРИАЛОВ

Разработана методика проектирования гладкой тонколистовой оснастки с заданным ресурсом для формования деталей из композиционных материалов. Под ресурсом оснастки понимается число качественных циклов формования до возникновения в ней недопустимого уровня остаточных деформаций. Алгоритм определения остаточных деформаций основывается на применении к системе формообразующая поверхность + формуемый пакет расчетной схемы тонких несимметричных пластин с учетом реологических процессов, протекающих во время формования. Задача решается перебором по толщине формообразующей поверхности. Проведены исследования зависимостей оптимальных параметров оснастки от исходных данных.

формообразующая оснастка, композиционные материалы, формование, ресурс, ползучесть, термоупругость

Введение

Применение композиционных материалов (КМ) в конструкциях летательных аппаратов (ЛА) открывает широкие перспективы по улучшению их эксплуатационных характеристик. Немаловажную роль в окупаемости изделий из КМ играют энерго- и трудозатраты, связанные с их производством. На формообразующую оснастку (ФО), используемую в авиапромышленности, накладываются жесткие требования к сохранению заданной геометрической точности. В то же время, практика показала, что при многократном использовании ФО теряет свои свойства, и после определенного числа циклов формования нуждается в ремонте или замене. Экономическая эффективность ФО определяется многими факторами, такими как: ресурс ФО (под которым понимается число качественных циклов формования), затраты на ее изготовление и эксплуатацию, замену и ремонт ФО, масштабами производства и другими. Однако, на практике определяющим фактором при проектировании ФО (особенно в условиях мелкосерийного производства) является ее ресурс. Кроме того, разработка методики проектирования ФО с

заданным ресурсом необходима для решения более широкой задачи определения экономической эффективности производства изделия из КМ. В работах Боголюбова В.С., Молодцова Г.А., Савина А.Г. [1 – 3] представлены исследования влияния параметров ФО на ее ресурс. Особое внимание уделялось исследованию процессов, протекающих в ФО при формовании изделия, однако, ни один из рассмотренных источников не давал четкой методики проектирования ФО. Поэтому разработка такой методики является актуальной и необходимой задачей. В статье представлена методика проектирования тонколистовой металлической ФО для формования изделий из КМ.

Постановка задачи. В качестве объекта исследования принимается тонколистовая металлическая ФО для формования плоских изделий панельного типа из КМ. ФО представляет собой формообразующую поверхность (ФП) 1, лежащую на жестком каркасе 2 (рис. 1).

При подъеме температуры в автоклаве пакет из КМ и ФП начинают расширяться (или сужаться) в соответствии со своими коэффициентами линейного температурного расширения (КЛТР). Вследствие

различия этих КЛТР КМ стремится сдвинуться относительно ФП, однако этому препятствует сила трения, возникающая между ФП и КМ.

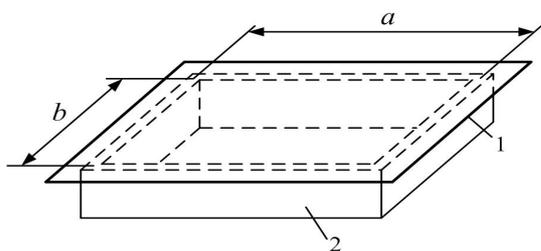


Рис. 1. Схема тонколистовой ФО

Для дальнейших исследований будем считать, что сила трения достаточна для обеспечения отсутствия проскальзывания КМ относительно ФП (что обычно имеет место [4]). Вследствие этого, в КМ и ФП будут возникать температурные напряжения. Эти напряжения можно определить, рассматривая систему КМ + ФП как слоистую пластину, получившую приращение температуры. Поскольку пластина (КМ + ФП) несимметрична относительно своей срединной плоскости, возникновение температурных напряжений будет сопровождаться ее изгибом.

Известно, что при длительном нагружении при повышенной температуре возникает явление ползучести материала. Таким образом, после охлаждения система КМ + ФП не вернется в исходное (недеформированное) состояние, иными словами, она будет иметь некоторый остаточный прогиб $w_{ост}^0$. При каждом последующем формовании ФП будет получать аналогичный прогиб, следовательно, после прохождения n циклов формования остаточный прогиб ФП составит

$$w_{ост} = w_{ост}^0 n. \quad (1)$$

После того как остаточный прогиб превысит допустимый прогиб формируемой детали, считаем, что ресурс ФО исчерпан.

Пусть N – заданное число циклов формования, тогда для обеспечения заданного ресурса ФО остаточный прогиб после одного цикла формования не должен превышать величины $w_{дон} / N$, где $w_{дон}$ –

допустимый прогиб формируемой детали.

В качестве критерия проектирования следует выбрать условие минимума массы ФО, что в рассматриваемом случае достигается путем уменьшения толщины ФП.

Определение остаточного прогиба ФП

Для большинства конструкций используются тонколистовые оснастки, которые позволяют получать сложную форму, а также обеспечивают равномерный прогрев по всему изделию. Поэтому в работе рассматривается данный тип оснастки и расчетная схема представляет собой композиционную и металлическую пластины, деформируемые совместно под действием постоянного температурного поля, которое заменяем действием моментов. Металлическая пластина шарнирно опирается по контуру (рис. 2).

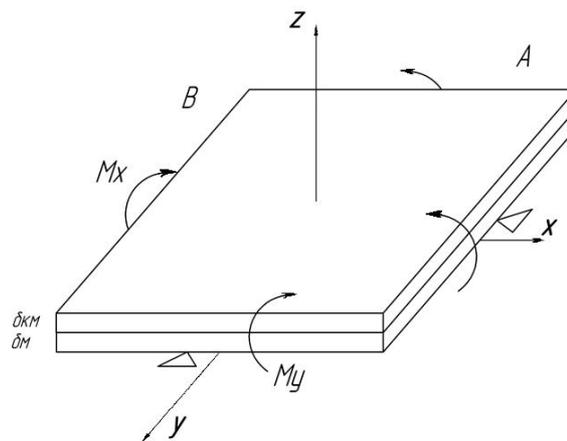


Рис. 2. Расчетная схема

Обозначим через B и A ширину и длину пластины, толщины обозначим через δ , индексы которого конкретно указывают толщину какого пакета рассматриваем.

Систему координат выбираем таким образом, чтобы плоскость xy совпала с нижней плоскостью оснастки; начало координат совместим с точкой середины основания оснастки. Ось y направим вдоль короткой стороны пластины, а ось x – вдоль длинной, ось z – вертикально вверх.

При нагружении нас будут интересовать лишь случаи, сопровождающиеся изгибом пластины. При деформации изгиба точки пластины получают перемещения (прогибы), перпендикулярные к срединной плоскости после деформации.

Для определения остаточного прогиба необходимо знать максимальный действительный и упругий прогиб ФО, так как остаточный прогиб находится как их разность

$$w_{ост} = w_{\max} - w_{упр}. \quad (2)$$

Следовательно, алгоритм определения ресурса проектируемой оснастки будет содержать два основных этапа, которые приведем ниже.

Определение упругого прогиба. Определение прогиба производится по методу Ритца – Тимошенко [5].

Для этого зададим w – прогиб в виде, удовлетворяющем условиям закрепления

$$\begin{aligned} \text{при } x = 0, y = 0 \quad w &= P; \\ \text{при } x = a, y = -b \quad w &= 0; \\ \text{при } x = -a, y = -b \quad w &= 0; \\ \text{при } x = a, y = b \quad w &= 0; \\ \text{при } x = -a, y = b \quad w &= 0; \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} w &= \sum_{i=1}^n f_i \cdot \eta_i = \\ &= \frac{(x^2 - a^2)(y^2 - b^2)(P + Q \cdot x^2 + R \cdot y^2)}{a^2 \cdot b^2}, \end{aligned} \quad (3)$$

где коэффициенты η_i удовлетворяют геометрическим и статическим условиям:

$$\begin{aligned} \eta_1 &= 1 \cdot \frac{(x^2 - a^2)(y^2 - b^2)}{a^2 \cdot b^2}; \\ \eta_2 &= x^2 \cdot \frac{(x^2 - a^2)(y^2 - b^2)}{a^2 \cdot b^2}; \\ \eta_3 &= y^2 \cdot \frac{(x^2 - a^2)(y^2 - b^2)}{a^2 \cdot b^2}, \end{aligned} \quad (4)$$

коэффициенты f_i представлены как

$$f_1 = P, f_2 = Q, f_3 = R. \quad (5)$$

Неизвестные коэффициенты P, Q, R определяются энергетическим методом из условия минимума полной энергии системы:

$$\begin{aligned} U &= \iint_s (M_x - dT_1) \cdot \chi_x ds + \\ &+ \iint_s ((M_y - dT_2) \cdot \chi_y + M_{xy} \cdot \chi_{xy}) ds. \end{aligned} \quad (6)$$

Максимальное значение упругого прогиба в точке находится в точке $x = 0, y = 0$. При этом моменты, действующие в системе, будут равны [6]:

$$\begin{aligned} M_x &= d_{11}\chi_x + d_{12}\chi_y - dT_1; \\ M_y &= d_{21}\chi_x + d_{22}\chi_y - dT_2; \\ M_{xy} &= d_{33}\chi_{xy}, \end{aligned} \quad (7)$$

где d_{ij} – обобщенные изгибные жесткости:

$$\begin{aligned} d_{11} &= -\frac{C_{12} \cdot (-B_{12} \cdot C_{11} + B_{11} \cdot C_{12})}{B_{11} \cdot B_{22} - B_{12}^2} + D_{11} + \\ &+ \frac{C_{11} \cdot (B_{12} \cdot C_{12} - B_{22} \cdot C_{11})}{B_{11} \cdot B_{22} - B_{12}^2}; \\ d_{12} &= -\frac{C_{12} \cdot (-B_{12} \cdot C_{12} + B_{11} \cdot C_{22})}{B_{11} \cdot B_{22} - B_{12}^2} + D_{12} + \\ &+ \frac{C_{11} \cdot (B_{12} \cdot C_{22} - B_{22} \cdot C_{12})}{B_{11} \cdot B_{22} - B_{12}^2}; \\ d_{21} &= -\frac{C_{22} \cdot (-B_{12} \cdot C_{11} + B_{11} \cdot C_{12})}{B_{11} \cdot B_{22} - B_{12}^2} + D_{21} + \\ &+ \frac{C_{12} \cdot (B_{12} \cdot C_{12} - B_{22} \cdot C_{11})}{B_{11} \cdot B_{22} - B_{12}^2}; \\ d_{22} &= -\frac{C_{22} \cdot (-B_{12} \cdot C_{12} + B_{11} \cdot C_{22})}{B_{11} \cdot B_{22} - B_{12}^2} + D_{22} + \\ &+ \frac{C_{12} \cdot (B_{12} \cdot C_{22} - B_{22} \cdot C_{12})}{B_{11} \cdot B_{22} - B_{12}^2}; \\ d_{33} &= -\frac{C_{33}^2}{B_{33}} + D_{33}, \end{aligned} \quad (8)$$

dT_i – температурный момент:

$$\begin{aligned} dT_1 &= -\frac{C_{11} \cdot (B_{T1} \cdot B_{22} - B_{12} \cdot B_{T2})}{B_{11} \cdot B_{22} - B_{12}^2} + \\ &+ D_{T1} + \frac{C_{12} \cdot (B_{12} \cdot B_{T1} - B_{11} \cdot B_{T2})}{B_{11} \cdot B_{22} - B_{12}^2}; \\ dT_2 &= -\frac{C_{12} \cdot (B_{T1} \cdot B_{22} - B_{12} \cdot B_{T2})}{B_{11} \cdot B_{22} - B_{12}^2} + \\ &+ D_{T2} + \frac{C_{22} \cdot (B_{12} \cdot B_{T2} - B_{11} \cdot B_{T1})}{B_{11} \cdot B_{22} - B_{12}^2}, \end{aligned} \quad (9)$$

B_{ij} – мембранные жесткости; C_{ij} – смешанные жесткости; D_{ij} – изгибные жесткости; B_{Ti} – мембранная составляющая температурного момента; D_{Ti} – изгибная составляющая температурного момента; $\chi_x, \chi_y, \chi_{xy}$ – кривизны, которые находят по формулам:

$$\chi_x = -\frac{\partial^2 w}{\partial x^2}; \chi_y = -\frac{\partial^2 w}{\partial y^2}; \chi_{xy} = -2\frac{\partial^2 w}{\partial x \partial y}. \quad (10)$$

Так как формуемый пакет является слоистым материалом, то определение общих характеристик пакета идет через характеристики слоя, который в свою очередь состоит из волокон и связующего [7].

Определение прогиба с учетом ползучести.

Определение максимального прогиба отличается от определения упругого тем, что учитывается ползучесть металлической ФП, волокна и связующего формуемого композита. Используя приведенный ниже алгоритм, определяем новые характеристики металла и связующего (волокно не деформируется при температуре формования существенно). Для этого необходимо определить:

– интенсивность напряжений:

$$\sigma_i = \sqrt{\sigma_x^2 - \sigma_x \cdot \sigma_y + \sigma_y^2}; \quad (11)$$

– деформации в металле и композите [М.А.]:

$$\begin{aligned} \varepsilon_i &= \frac{\sigma_i}{E} + \left(\frac{\sigma_i}{L}\right)^{qt} \cdot \Delta T; \\ \varepsilon_i &= m_0 \cdot sh\left(\frac{\sigma_i}{\sigma_\xi}\right) \cdot \left(1 + \left(\frac{t_n}{t_k}\right)^\eta\right), \end{aligned} \quad (12)$$

где $L, q, \sigma_\xi, \lambda, m_0, \eta$ – эмпирические коэффициенты, σ_x, σ_y – напряжения в формуемом пакете и ФП по соответствующим осям [7], ΔT – температура, представленная разностью температур конца t_k и начала t_n формования

$$\Delta T = t_k - t_n. \quad (13)$$

Получим новые характеристики формуемого пакета:

$$E_0 = \frac{\sigma_i}{\varepsilon_i \cdot (1 - \mu^2)}; \quad G_0 = \frac{E_0}{2 \cdot (1 + \mu)}. \quad (14)$$

Повторив расчет по формулам (3 – 10), получим максимальное значение прогиба с учетом ползучести W_{max} .

Проектирование гладкой ФО

Задача решается перебором по толщине от некоторого начального значения до значения, удовлетворяющего необходимому ресурсу. Начальное значение толщины принимается из различных условий, таких как: способность выдерживать массовую нагрузку от формуемого пакета или условие свариваемости.

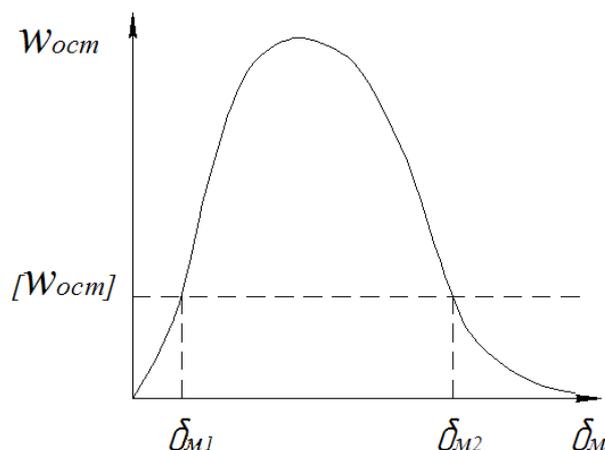


Рис. 3. График зависимости остаточного прогиба пакета КМ+ФП от толщины ФП

На рис. 3 изображена зависимость остаточного прогиба ФП в зависимости от ее толщины. Штриховой линией нанесен допустимый остаточный прогиб ФП. Рис. 3 показывает, что заданный ресурс оснастки удовлетворяется, если толщина находится в диапазоне от 0 до δ_{M1} , а также, если она превышает значение δ_{M2} . Однако, непосредственные расчеты показали, что величина δ_{M1} является чрезвычайно малой, и такая формообразующая поверхность не способна выдержать массовую нагрузку от формуемого пакета.

Следовательно, допустимым значением толщины ФП является значение δ_{M2} .

Исследования

Предварительный анализ показал, что увеличение толщины контурозадающего элемента оснастки является эффективным способом увеличения ресурса с точки зрения прочности, но никак не материально-экономических характеристик. Проектируемая оснастка является очень громоздкой и масса, найденная по следующей формуле:

$$m_{\delta} = \rho \cdot S \cdot \delta_m = \rho \cdot A \cdot B \cdot \delta_m, \quad (15)$$

где ρ – плотность металлической ФП оснастки; S – площадь ФП оснастки; δ_m – толщина ФП оснастки; A, B – геометрические размеры формообразующей поверхности оснастки, получается невероятно большой, что вынуждает искать более рациональные конструкции оснастки.

Зависимость массы ФП оснастки от термоупругих характеристик. Зафиксируем габаритные размеры оснастки $A = 2000$ мм, $B = 1000$ мм. Материал оснастки – сталь, заданный ресурс 20 мт, толщина 1 мм. Изменяемыми параметрами являются отношение $E_1/E_2=p$ (при $E_1=100$ ГПа), и α_1, α_2 .

Для большей наглядности результаты данного исследования представлены в виде графиков на рис. 4 и 5.

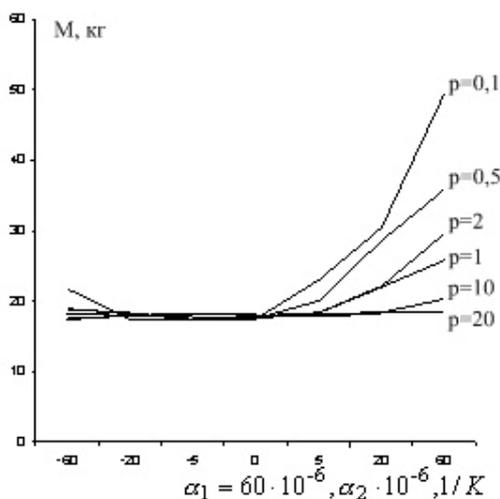


Рис. 4. Зависимость массы ФП от α_2 и p при $\alpha_1 = 60 \cdot 10^{-6} 1/K$

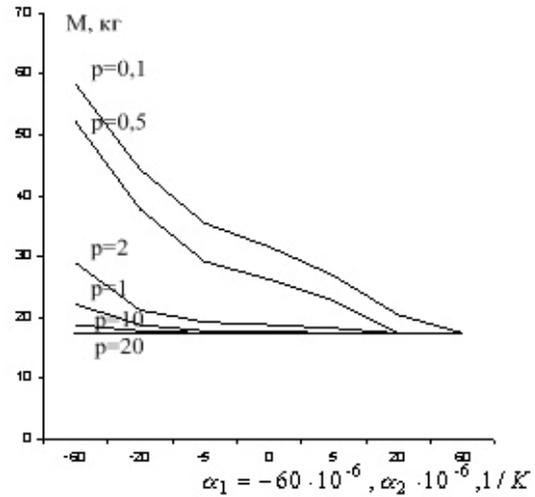


Рис. 5. Зависимость массы ФП от α_2 и p при $\alpha_1 = -60 \cdot 10^{-6} 1/K$

Графики имеют подобный характер. В точках достижения полярных значений КЛТР масса минимизируется, в точках с равными КЛТР наступает скачок массы, который увеличивается с уменьшением соотношения $E_1/E_2=p$.

Очевидно, что для минимизации значения массы необходимо обеспечить противоположные КЛТР формуемого пакета и контурозадающего элемента оснастки, что возможно только при переходе от металлической оснастки к композитной.

Зависимость массы ФП оснастки от требуемого ресурса. Возьмем квадратную оснастку с размерами стороны $A = B = 2000$ мм. Материал оснастки – сталь, толщина – изменяемая величина. Формуем композит с характеристиками:

$$E_1 = 100 \text{ ГПа}, E_2 = 10 \text{ ГПа}, \mu_{12} = 0,35, G = 6 \text{ ГПа}, \\ \alpha_1 = 0, \alpha_2 = 30 \cdot 10^{-6} 1/^\circ K, \text{ толщиной } 1 \text{ мм}.$$

Изменяемым параметром является ресурс N проектируемой оснастки.

Детальный анализ численных значений показал, что увеличение задаваемого ресурса ведет к однозначному увеличению массы конструкции (рис. 6) и толщины ФП оснастки (рис. 7).

Однако, при выходе на многосерийное производство значение массы и толщины ФП оснастки устанавливается.

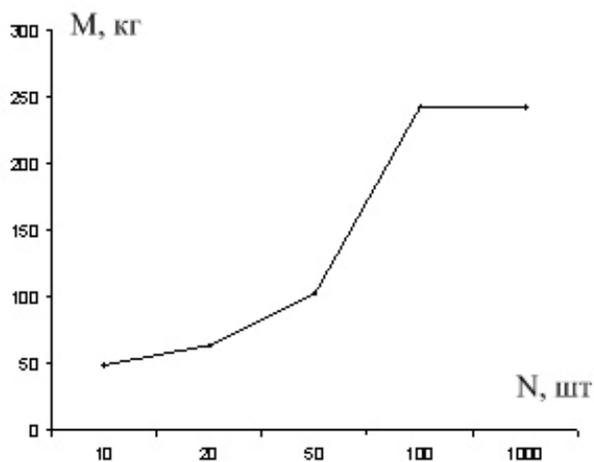


Рис. 6. Зависимость массы ФП от ресурса

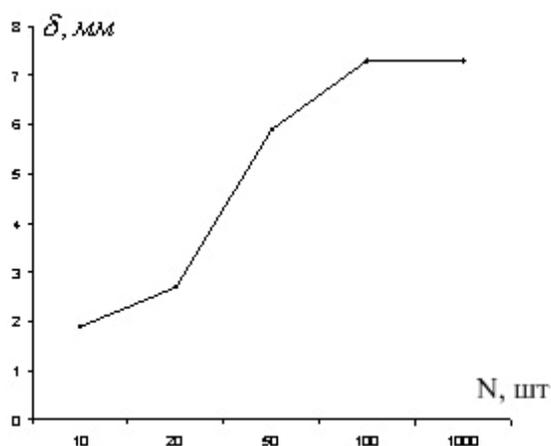


Рис. 7. Зависимость толщины ФП от ресурса

Заключение

Таким образом, создана методика проектирования гладкой оснастки с заданным ресурсом, из численного анализа которой следует:

1) применение КМ в качестве материала оснастки даст возможность компенсировать действие реакции формуемого пакета, из-за большой вариации, как свойствами самого формообразующего пакета, так и его структурой;

2) создание оснастки на большое значение ресурса требует увеличения толщины гладкой оснастки. При проектировании оснастки на число съемов больше 70 конструктивные параметры оснастки выходят на постоянное значение;

3) зависимость массы ФП от заданного ресурса близка к квадратичной, следовательно, при большом заданном ресурсе применение гладкой оснастки является неэффективным.

Следовательно, необходимо искать другие пути повышения жесткости ФП, например, подкрепление ее ребрами жесткости.

Литература

1. Боголюбов В.С. Расчет тонкостенных конструкций оснастки из КМ // Механика КМ. – Рига, 1989. – № 6. – С. 851-862.
2. Савин А.Г., Игнатенко Г.К. Роль оснастки в обеспечении заданного теплового воздействия на конструкции из КМ при автоклавном формовании // АП. – 1999. – № 5. – 988 с.
3. Молодцов Г.А. Остаточные напряжения в слоистых анизотропных пластинах // Механика КМ – Рига, 1979. – № 4. – С. 730-733.
4. Гайдачук А.В., Петропольский В.С., Шевцова М.А. Формообразующая оснастка для производства изделий из КМ. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 2002. – 62 с.
5. Карпов Я.С., Ставиченко В.Г. Определение температурных прогибов закрепленных слоистых пластин // Авиационно-космическая техника и технология. – 2005. – № 4. – С. 163-165.
6. Васильев В.В. Механика конструкционных КМ. – М.: Машиностроение, 1988. – 271 с.
7. Карпов Я.С., Кривенда С.П., Тараненко И.М. Основы производства изделий из КМ. – Х.: Нац. аэрокосм. ун-т «ХАИ», 1999. – 37 с.

Поступила в редакцию 25.05.2006

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.Н. Кобрин, Национальный аэрокосмический университет им. Н.Е. Жуковского «ХАИ», Харьков.