

## К РАСЧЕТУ ПОСЛОЙНОЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКОЙ ОСНАСТКИ ДЛЯ ПРОИЗВОДСТВА АНТРОПОМОРФНЫХ ИЗДЕЛИЙ

*Инж. Кучинский С. П.; доц., к. т. н. Свирский Д. Н.;  
проф. Сункуев Б. С (ВГТУ)*

Антропоморфные поверхности, контактирующие с телом человека и/или повторяющие его форму, широко применяются при производстве изделий легкой и других отраслей промышленности (манекены, колодки для обуви и головных уборов, рукоятки ручного инструмента, элементы изделий спортивного назначения и т.п.).

Одним из перспективных способов изготовления антропоморфных изделий является формование термопластов в высокоэластическом состоянии. В этом случае технологическая оснастка состоит из двух полуформ, закрепленных на плитах и устанавливаемых на рабочий стол установки формования. Применение технологии послойного синтеза с использованием лазерного раскроя [1] для изготовления оснастки позволяет автоматизировать процесс ее получения и обеспечить точное соответствие оснастки требуемым размерам. Одной из актуальных задач при этом является проектирование и изготовление оснастки, сочетающей достаточный уровень эксплуатационных свойств (главным образом прочностных) с минимальной стоимостью. Для успешного решения данной задачи необходимо, прежде всего, разработать методику прочностного расчёта для выбора материала, наиболее эффективного по критерию "прочность/стоимость".

Для предварительной оценки прочности полуформ были изготовлены две полуформы манекена мужской фигуры 46-го размера из наиболее дешёвого материала – ДВП марки ПТ-100 по ГОСТ 4598-86 толщиной 3.2 мм. Слои вырезали на установке лазерного раскроя, содержащей CO<sub>2</sub>-лазер мощностью 100 Вт. Экспериментальную партию манекенов изготовили методом вакуумного формования из пластика марки АБС-1106-30И по ТУ 6-05-1587-84 толщиной 5 мм. Установлено, что полуформы из ДВП имеют недостаточную прочность и разрушаются после нескольких циклов формования. Анализ характера повреждений позволил предложить следующую модель разрушения.

Разрушение полуформы происходит в момент снятия с неё отформованного изделия. Отформованное изделие охлаждается непосредственно на полуформе, поэтому из-за термической усадки пластика в последнем возникают напряжения растяжения, сжимающие полуформу и препятствующие снятию с неё отформованного изделия. При снятии изделия с полуформы, на неё, вследствие трения, действуют силы, параллельные направлению перемещения изделия. Наибольшие силы действуют на участки, расположенные под наименьшим углом к направлению перемещения изделия. Нижняя поверхность 1 (рис. 1) манекена, в соответствии с конструкторско-нормативной документацией, должна быть перпендикулярна оси манекена, а верхняя поверхность 2 – располагаться под наклоном. Однако при вакуумном формовании поверхность формы должна обеспечивать возможность снятия с неё изделия после формования, поэтому верхняя поверхность спинной полуформы также выполняется перпендикулярной оси манекена. Таким образом, наибольшие силы сдвига действуют на первый и последний слой спинной полуформы, что приводит, во-первых, к сдвигу слоев, а во-вторых, – к изгибу полуформы в направлении действия этих сил. Изгиб, в свою очередь, может вызывать выход из паза вертикального элемента 3 (рис.2), служащего для базирования горизонтальных слоев и выполненного из более жесткого материала с целью обеспечения возможности сборки конструкции. Выход вертикального элемента из паза обусловлен отслоением клеевого слоя, соединяющего этот элемент с горизонтальными слоями, вследствие плохой адгезии клеевого слоя к кромкам горизонтальных слоев, имеющим

зону обугливания, что связано с особенностями лазерной резки древесных композиционных материалов, протекающей в режиме термодеструкции. При сдвиге горизонтальных слоев разрушение происходит либо по клеевому слою, либо по основному материалу, в зависимости от прочностных и адгезионных характеристик клея и материала слоев.

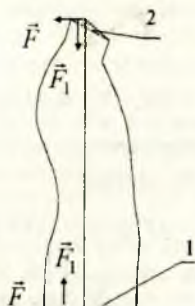


Рис. 1. Схема действующих на полуформу сил в момент снятия готового изделия

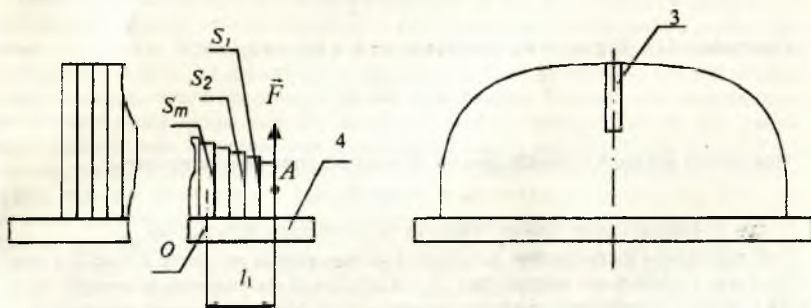


Рис. 2. Схема к расчету полуформы на прочность и изгиб.

Рассчитаем напряжения, возникающие при сдвиге слоев. После снятия отформованного и охлажденного изделия с полуформы, оно, под воздействием возникших ранее напряжений, упруго сжимается, в результате чего его продольный размер  $l_0$  уменьшается на величину  $\Delta l$ , а размер, соответствующий толщине  $i$ -го слоя полуформы, уменьшается с  $l_{0i}$  до  $l_i$  на величину  $\Delta l_i$ . Следовательно, напряжение растяжения  $\sigma_i$ , возникающие в поперечном сечении пластика, соответствующем  $i$ -му слою полуформы, под воздействием термической усадки в процессе вакуумного формования определяются по формуле:

$$\sigma_i = E \frac{\Delta l_i}{l_{0i}} \quad (1)$$

где  $E$  – модуль упругости пластика при растяжении, МПа.

Тогда сила  $F_1$ , сжимающая полуформу в продольном направлении определяется по формуле:

$$F_1 = S_i \cdot \sigma_i \quad (2)$$

где  $S_i$  – площадь поперечного сечения отформованного изделия на участке соответствующем  $i$ -му слою полуформы,  $\text{м}^2$ .

Из формул (1) и (2) следует

$$\Delta l_i S_i = \Delta l_{i+1} S_{i+1},$$

т.е. можно записать систему уравнений:

$$\begin{cases} \Delta l_1 S_1 = \Delta l_2 S_2 \\ \Delta l_2 S_2 = \Delta l_3 S_3 \\ \dots\dots\dots \\ \Delta l_{n-1} S_{n-1} = \Delta l_n S_n \end{cases}$$

где  $n$  – количество слоев в полуформе.

Решая систему относительно  $\Delta l_n$ , получим:

$$\Delta l_n = \frac{\Delta l}{\sum_{k=1}^{n-1} \frac{\prod_{i=k+1}^n S_i}{\prod_{i=k}^{n-1} S_i} + 1}$$

Подставив (1) в (2) для  $i = n$  и учитывая, что  $l_0 = l_0/n$ , получим:

$$F_1 = \frac{nE}{l_0} \Delta l_n S_n$$

При снятии изделия с полуформы на её крайние слои действуют силы

$$F = f \cdot F_1, \quad (3)$$

где  $f$  – коэффициент трения пластика по материалу полуформы.

При вакуумном формовании полуформа укладывается на плиту 4 (рис.2) и крепится к ней в нескольких местах (оси  $O$ ). Касательные напряжения возникают только на участке  $l$ , полуформы, расположенном между осями крепления полуформы и крайними слоями (клеевые слои  $S_1 \dots S_m$ ). Следовательно, разрушение может произойти либо по слою полуформы с наименьшим сечением, либо по клеевому слою с наименьшей площадью.

Касательные напряжения, возникающие на участке  $l$ , полуформы

$$\tau = \frac{F}{S_{\min}}, \quad (4)$$

где  $S_{\min}$  – площадь наименьшего из слоев полуформы на участке  $l$ , или площадь наименьшего из клеевых слоев  $S_1 \dots S_m$ .

Условие прочности при сдвиге имеет вид

$$\tau \leq \frac{\tau_0}{k}, \quad (5)$$

где  $\tau_0$  – предел прочности материала слоя или клея при сдвиге, МПа;

$k$  – коэффициент запаса.

Для расчёта величины наибольшего прогиба полуформы под воздействием силы  $F$  (рис.2), рассмотрим участок  $l$ , полуформы как балку с поперечным сечением, соответствующим сечению среднего на этом участке слоя. Тогда наибольший прогиб (в точке  $A$ ) определится по формуле

$$\sigma_{\max} = \frac{Fl_1^3}{3EJ_x} \quad (6)$$

где  $E_u$  – модуль упругости материала горизонтальных слоев при изгибе, МПа;  
 $J_x$  – осевой момент инерции сечения среднего слоя относительно оси  $x$ , см<sup>4</sup>.

Касательные напряжения на участке  $l_1$  полуформы, рассчитанные по приведенным выше формулам, составляют 1,42 МПа. Предел прочности  $\tau_0$  для ДВП, определённый по ГОСТ 14759-69 – 1,45 МПа, для клея НИИФ С-35 – 1,47 МПа [2]. С учётом коэффициента запаса допускаемые напряжения не должны превышать 0,39 МПа как для ДВП, так и для клеевого слоя. Следовательно, разрушение может происходить как по ДВП, так и по клеевому слою, что и наблюдалось при изготовлении манекенов. Изгиб полуформы на участке  $l_1$ , согласно формуле (6) составил всего 0,007 мм, поэтому этой величиной можно пренебречь.

Анализируя формулы (1)...(5) можно сделать вывод, что для предотвращения разрушения полуформы есть два пути: снизить коэффициент трения  $f$  или использовать более прочный материал слоев и клеев.

Наиболее простой путь снижения коэффициента трения – покрытие поверхности полуформы смазкой, однако поверхность ДВП впитывает любую смазку вследствие своей пористости. Можно нанести в качестве подложки покрытие, препятствующее впитыванию смазки, но испытания в заводских условиях показали, что его необходимо обновлять после нескольких циклов формования. Поэтому для изготовления слоев полуформы лучше выбрать материал, не впитывающий смазку. Для увеличения прочностных характеристик полуформы следует выбрать более прочный материал прежде всего для крайних, наиболее подверженных разрушению, слоев и более прочный клей. Можно, также, ввести в конструкцию полуформы дополнительные крепёжные элементы для предотвращения сдвига слоев, однако это потребует индивидуальной проработки конструкции и её расчёта под каждый вид изделий. Кроме того, крайние слои всё равно будут подвержены разрушению в процессе снятия изделий с полуформы. Таким образом, для предотвращения разрушения полуформы необходимо подобрать более прочный материал, позволяющий наносить на его поверхность смазку, уменьшающую коэффициент трения.

Предъявляемым требованиям лучше всего соответствуют пластмассы. Традиционный алгоритм рационального выбора пластмасс [3] позволил определить, что для изготовления слоев полуформы следует использовать полистиролы. Так при изготовлении слоев из полистирола УПС-0803Э (ГОСТ 28250-84) коэффициент трения, благодаря смазыванию поверхности силиконовой смазкой, удалось снизить в 2,4 раза, что во столько же раз снизило и касательные напряжения. Предел прочности полистирола также в 2...3 раза выше, поэтому можно использовать и более прочные клеи, например, РАФ-10 ( $\tau_0$  до 12,75 МПа).

Использование пластических масс для изготовления полуформ позволило отказаться от изготовления мастер-моделей и сплошных алюминиевых полуформ, гарантируя необходимую прочность слоистых полуформ для любых антропоморфных изделий.

### Литература:

1. Ракович А.Г., Свирский Д.Н., Кучинский С.П. Моделирование послыоного формообразования в компактных лазерных производственных системах. 1. Погрешность формообразования. // Весці НАН Беларусі, сер. Фіз.-тэхн. навук, 1998, № 3, С. 83-85.
2. Справочник по клеям / Л.Х.Айрапетян, В.Д.Заика, Л.Д.Елецкая, Л.А. Яншина. - Л.: Химия, 1980. - 304 с.
3. Каменев Е.И., Мясников Г.Д., Платонов М.П. Применение пластических масс: Справочник. – Л.: Химия, 1985. – 448 с.