

УДК 621.7.043

## ПРИМЕНЕНИЕ АНТИФРИКЦИОННЫХ ПОКРЫТИЙ ДЛЯ СНИЖЕНИЯ КОНТАКТНОГО ТРЕНИЯ ПРИ ФОРМООБРАЗОВАНИИ ОБОЛОЧЕК ДВОЙНОЙ КРИВИЗНЫ ОБТЯЖКОЙ НА ОБТЯЖНЫХ ПУАНСОНАХ ИЗ АЛЮМИНИЕВЫХ СПЛАВОВ

© 2021 Е.Г. Карпухин, Г.Л. Ривин, А.О. Кошкина

Ульяновский государственный технический университет, Ульяновск, Россия

Статья поступила в редакцию 10.12.2020

В статье приводятся результаты исследований антифрикционных покрытий, потенциально применимых на обтяжных пуансонах. Обоснована целесообразность применения антифрикционных покрытий с целью снижения трения при формообразовании оболочек двойной кривизны обтяжкой. Для обоснования было проведено численное моделирование процесса формообразования обтяжкой в CAE-системе «Ls-dyna». По результатам моделирования наблюдается следующая взаимосвязь: чем ниже коэффициент трения, тем более равномерно распределяются деформации утонения по толщине заготовки при формообразовании обтяжкой. Описаны режимы испытаний для определения коэффициента трения на машине трения МТУ-01, а также способы получения других основных функциональных и технологических свойств антифрикционных покрытий. Определены антифрикционные и технологические свойства покрытий, такие как коэффициент трения, адгезия, износостойкость, условная твердость, а также время и температура полимеризации покрытия.

*Ключевые слова:* Обтяжка, обшивки самолета, антифрикционные покрытия, обтяжные пуансоны из алюминиевых сплавов, моделирование.

DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-1-41-47

Интенсивное развитие авиации требует разработки новых и совершенствования уже имеющихся процессов изготовления авиационной техники. Для серийного производства современной авиационной техники требуется использовать оборудование, сводящее к минимуму человеческий фактор. Любые ручные доводочные операции имеют высокую трудоемкость, а также не позволяют достичь требуемой повторяемости, что необходимо для серийного производства. Стоит отметить, что на обшивках, после проведения данных операций, заданные проектировщиком аэродинамические формы самолета теряются, что влияет на летно-технические характеристики и ресурс работы конечного изделия [1].

К обшивкам современного самолета предъявляются крайне высокие требования по качеству. Высокое качество обшивок определяется, в основном, тремя факторами:

- соответствие полученной геометрии обшивки теоретическим обводам самолета;
- отсутствие рисков и царапин с внутренней стороны обшивок;

- отсутствие недопустимо высоких значений местного утонения, не предусмотренного конструкторской документацией.

Обшивки изготавливаются методом формообразования обтяжкой, сущность которого заключается в том, что заготовка, установленная в зажимы обтяжного пресса, обтягивается по обтяжному пуансону за счет движения зажимов, стола и портала (при необходимости), с установленной технологической оснасткой (обтяжным пуансоном и прижимом). При этом обтяжка всегда сопровождается растяжением заготовки. В зависимости от схемы деформирования, растяжение может быть на предварительном этапе, на заключительном в качестве калибрующего усилия, а также во время изгиба, либо на каждом из этапов. Благодаря растяжению всех сечений заготовки до состояния пластичности, напряжения от растягивающих усилий складываются с напряжениями от изгибающих усилий, смещая нейтральный слой листовой заготовки вплоть до того, что он выходит за пределы сечения. Соответственно по всему сечению заготовки распределены напряжения от растягивающих усилий, что снижает значение упругой отдачи. При этом, необходимо отметить, что без наличия дополнительного растяжения, при изгибе, в окрестностях нейтрального есть наличие участков, изгибающихся в пределах упругих деформаций, тем самым после снятия усилий изгиба верхние слои заготовки сокращаются, а нижние (сжатые) уд-

---

*Карпухин Евгений Геннадьевич, аспирант.*

E-mail: ew.karpuhin1@yandex.ru

*Ривин Георгий Леонидович, кандидат технических наук, доцент кафедры «Самолетостроение».*

E-mail: rg122@rambler.ru

*Кошкина Анастасия Олеговна, кандидат технических наук, доцент кафедры «Самолетостроение».*

E-mail: fallen0008@mail.ru

линяются, особенно это сильно выражено при больших радиусах изгиба [2].

Обтяжные пуансоны изготавливаются из чугунов, стеклопластиков, древесных пластиков, и алюминиевых сплавов [3]. Наиболее распространенным материалом для серийных производств является вторичное алюминиевое литье из алюминиевых отходов, образовавшихся во время производства самолетов. Обтяжные пуансоны из данного материала характеризуются высокой жесткостью в зоне рабочей поверхности, при низкой стоимости алюминиевых отходов. Жесткость в зоне рабочей поверхности является одним из определяющих параметров, при выборе материала конструкции обтяжного пуансона. Если материалом конструкции не обеспечивается достаточная жесткость рабочей поверхности обтяжного пуансона, происходит её проседание. Данное обстоятельство ведет к не соответствию геометрии рабочей поверхности обтяжных пуансонов теоретическим обводам самолета. Основным недостатком обтяжных пуансонов из алюминиевых сплавов является высокий коэффициент трения при контакте с заготовками из алюминиевых сплавов, из которых изготовлены большинство обшивок гражданских самолетов. Известно, что значение коэффициента трения при контакте алюминиевых сплавов, в среднем составляет 0,25...0,3 [4].

Контактное трение, возникающее в процессе формообразования обтяжкой, влияет на возникновение рисков, царапин, распределение толщин заготовки, а также наибольшую деформацию заготовки  $e_{\max}$  в конце процесса обтяжки, которая определяется зависимостью [5]:

$$e_{\max} = e_{10} K_{\mu}, \quad (1)$$

где  $e_{10}$  – деформация в точке полюса поверхности (максимального поперечного сечения), в которой геометрическая форма оболочки двойной кривизны локально характеризуется величиной и знаком гауссовой кривизны [6, 7].

Коэффициент, учитывающий влияние трения на перераспределение деформаций при обтяжке [8]:

$$K_{\mu} = \exp\left(\frac{\mu \cdot \alpha_k}{2n}\right), \quad (2)$$

где  $\mu$  – коэффициент трения между поверхностями листовой заготовки и обтяжного пуансона;  $\alpha_k$  – угол охвата заготовкой обтяжного пуансона;  $n$  – константа упрочнения материала заготовки, получаемая из диаграммы одноосного растяжения материала.

На современном этапе развития аналитических методик по расчету процесса формообразования обтяжкой, умножение на приведенный  $K_{\mu}$  в формуле (2), позволяет определять ширину очага деформации на формовочной стадии

в районе центрального поперечного сечения, а также деформацию листовой заготовки на сходе с обтяжного пуансона, что показано исследователем в источнике [7].

Как видно из формул (1) и (2), чем выше коэффициент трения, тем больше требуется растянуть заготовку для её пластического деформирования. Как следствие, для получения большей деформации заготовки, необходимо увеличивать количество переходов. Допустимая деформация за один переход определяется путем сравнения геометрического коэффициента обтяжки с предельным геометрическим коэффициентом обтяжки, определяемым исходя из относительного поперечного сужения материала при испытаниях на одноосное растяжение, коэффициента  $K_{\mu}$ , а также коэффициентов безопасности полученных опытным путем [8]. При этом, геометрический коэффициент обтяжки может определяться разными путями, которые приведены в источниках [5, 8]. Также допустимая деформация за один переход может быть увеличена путем использования различных способов интенсификации [9].

Процесс формообразования обтяжкой происходит при низких скоростях, но с достаточно большими давлениями, которые определяются по следующей зависимости [3]:

$$q_{ji} = s(\sigma_{xji} C_{2ji} + \sigma_{yji} C_{1ji} - 2r_{xyji} C_{12ji}), \quad (3)$$

где  $s$  – толщина заготовки;  $C_{1ji}$ ,  $C_{2ji}$ ,  $C_{12ji}$  – кривизна в направлениях  $x$  и  $y$  и смешанная кривизна поверхности;  $\sigma_{xji}$ ,  $\sigma_{yji}$ ,  $r_{xyji}$  – напряжения в рассматриваемой точке поверхности;  $j$  – номер сечения;  $i$  – номер точки поверхности.

С достаточной для практических целей точностью можно определить среднее удельное давление на рабочую поверхность обтяжного пуансона по формуле Лапласа:

$$q = \frac{s \sigma_b}{r}, \quad (4)$$

где  $s$  – толщина заготовки;  $\sigma_b$  – предел прочности материала заготовки;  $r$  – минимальный радиус на гребне деформированной заготовки либо обтяжного пуансона.

Удельное давление, также, возможно определить по методике, описанной в статье [10].

Скорость деформирования листовой заготовки зажимами для каждого обтяжного пресса разная. Но по имеющимся данным [3] для продольной обтяжки, при увеличении остаточной деформации растяжения заготовки, необходимо снижать скорость деформирования. Необходимо отметить, что с каждым переходом, скорость деформирования уменьшается (рис. 1).

График, показанный на рисунке 1, составлен для схемы деформирования: изгиб-растяжение. В данной схеме производится предварительный изгиб зажатой заготовки по обтяжному пуан-

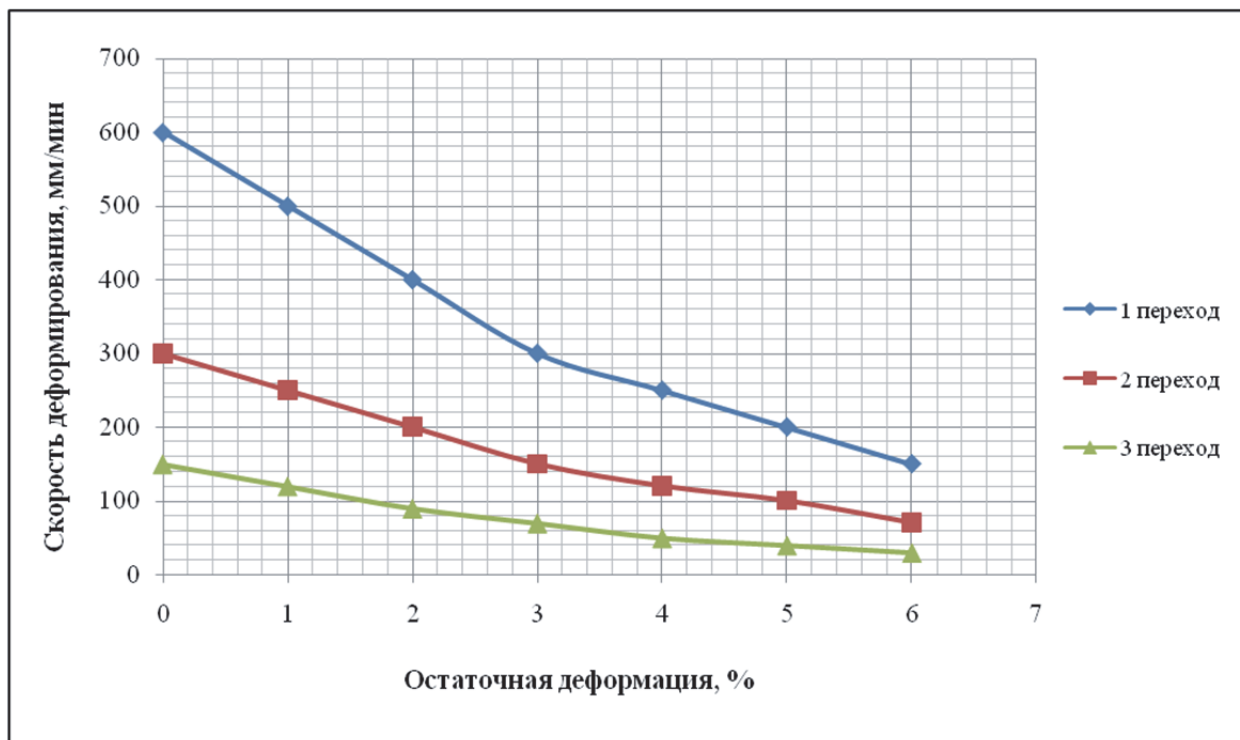


Рис. 1. График изменения скоростей при формообразовании [3]

сону при помощи зажимов и подъема стола с обтяжным пуансоном (при наличии на обтяжном прессе механизма подъема стола). Затем производится калибровка заготовки путем её растяжения. В соответствии с данной схемой, наибольшие силы трения в данном случае возникают при начальном растяжении и скорости 600 мм/мин. Давление обтяжного пуансона на поверхность заготовки при этой схеме остается постоянным и сохраняет значение, полученное на этапе изгиба заготовки.

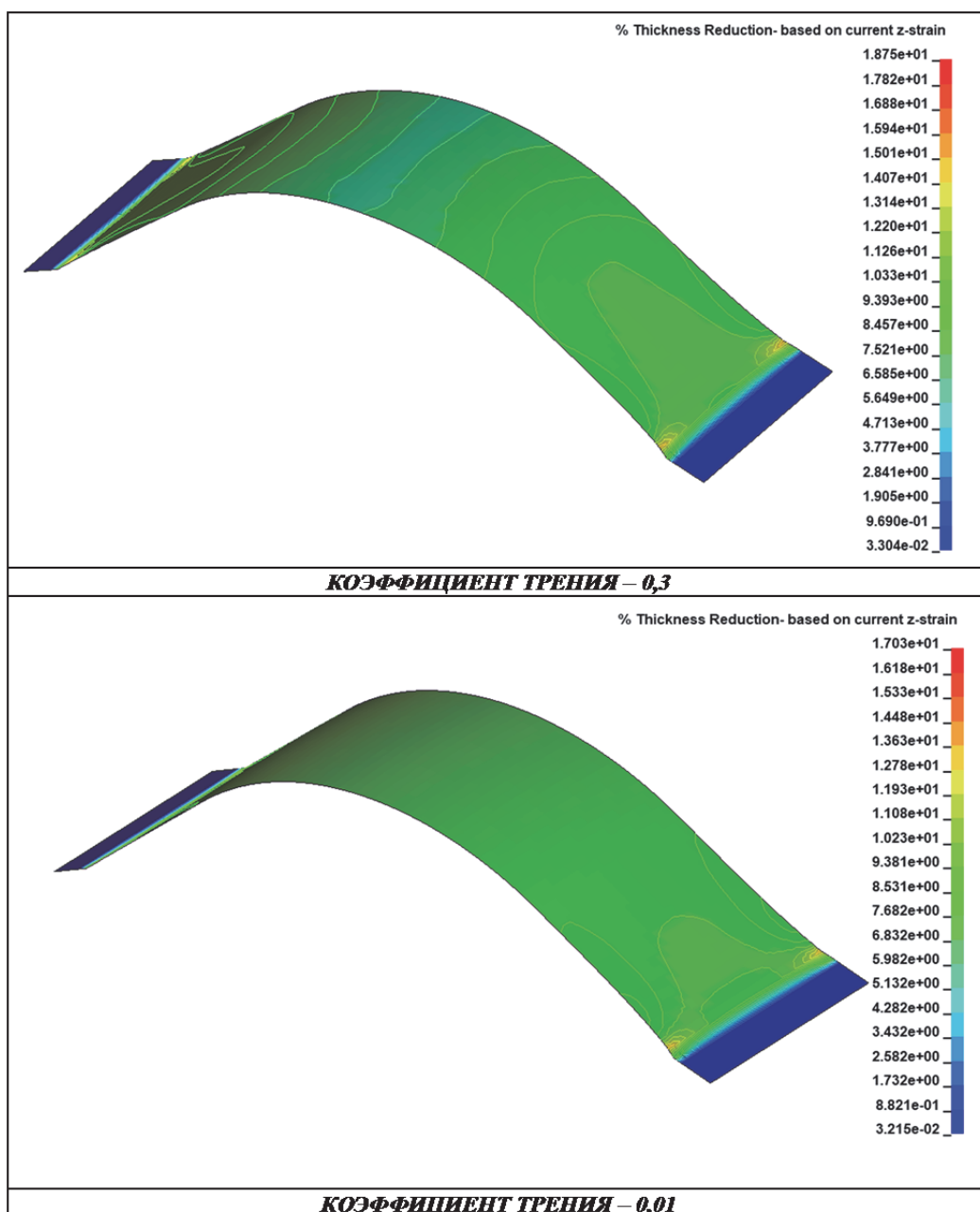
Для оценки целесообразности снижения коэффициента трения, было проведено динамическое моделирование методом конечных элементов процесса формообразования поперечной обтяжкой при одних и тех же усилиях и скоростях деформации. Как видно из рисунка 2, снижение коэффициента трения до значения 0,01 обеспечивает более равномерное распределение деформаций утонения по толщине заготовки в зоне до обреза обшивки. Данное обстоятельство свидетельствует о том, что происходит растяжение всех сечений заготовки до состояния пластичности, которое позволяет снизить величину упругой отдачи и практически исключить высокие значения местного утонения.

При этом необходимо отметить, что подобные результаты по распределению деформаций утонения были получены в конечно-элементных моделях исследователей Сурудина С.В. и Михеева В.А., что отражено в диссертации [7].

До исследований авторов, Михеевым В.А. были разработаны приемы для снижения внеш-

него трения при обтяжке [5]. В качестве исследуемых материалов были выбраны солидол, различные комбинации резин со смазками, полимерные пленки, покрытия, нанесенные анодированием и плазменным напылением, стеклопластиковые покрытия, с антифрикционным наполнителем, а также покрытия на основе фторопласта. Наиболее низкие значения коэффициента трения  $\mu = 0,02...0,04$  были достигнуты при использовании покрытия на основе фторопласта, оксидной пленки с фторированным графитом и плазменного слоя БрА-10 с использованием смазки в виде солидола. Учеными из Воронежского технического университета был разработан способ снижения трения при формообразовании обтяжкой с применением смазки и двух слоев пленочного материала [11]. Недостатком разработанного способа является возможность разрыва пленочного материала при формообразовании обшивок знакопеременной кривизны. Это обусловлено тем, что формообразование обратной кривизны производится с помощью приложения дополнительных усилий с помощью портала обтяжного прессы через прижим.

Нашей научной группой были проведены исследования по возможности применения антифрикционных покрытий без использования дополнительных жидких смазочных материалов. Антифрикционные покрытия формируют граничные плёнки на микронеровностях рабочей поверхности обтяжного пуансона из алюминиевых сплавов, что обеспечивает за-



**Рис. 2.** Распределение деформации утонения листовой заготовки на заключительном этапе формообразования поперечной обтяжкой в процентах от толщины

щиту внутренней поверхности листовых заготовок от рисков и царапин. При использовании жидких смазочных материалов, необходимо добавлять в технологический процесс многопереходной обтяжки обшивок сложной геометрии дополнительные операции, а именно смывку и последующую сушку заготовки. В случае, если не смыть смазочные материалы с листовой заготовки, то при термической обработке они сгорят и создадут сложно удаляемый пригар на заготовке. Важным обстоятельством является то, что использование жидких смазочных материалов без каких-либо покрытий не исключает полностью контакт микронеровностей листовой заготовки и обтяжного

пуансона, что ведет к образованию рисков и царапин.

Для определения режима испытаний антифрикционных материалов, был выбран принятый в конструкторской практике расчет по величине произведения удельного давления на скорость  $q \cdot V$  [12]. Смысл данной величины заключается в том, что при её вычислении можно проводить сравнительный анализ с уже известными случаями выбора антифрикционных покрытий, а также варировать параметрами скорости и давления трибофизических процессов. А именно, если в триботехнических испытаниях необходимо повысить скорость скольжения, то требуется уменьшить контактное давление на

определенную величину, зависящую от процессов перехода кинетической энергии во внутреннюю. Использование величины  $qV$  позволило рассчитать режим испытания антифрикционных покрытий на машине трения МТУ-01, у которой ограничивающим условием являлась высокая скорость вращения образца 200 об/мин. Расчеты приведены в статье [10]. Для заготовки обшивки «Окантовки двери», толщиной  $s = 8$  мм, с углом охвата листовой заготовки  $\alpha_k = 92^\circ$ , и скоростью деформации 4 мм/с было получено значение  $qV = 12,2$  МПа·мм/с. Антифрикционные покрытия были испытаны при силе прижима 3,24 Н и скорости вращения 200 об/мин.

Для проведения экспериментальных исследований, исходя из анализа технологических и эксплуатационных свойств материалов, было выбрано шесть антифрикционных материалов:

Покрытие 1. Фторполимерный лак холодного отверждения.

Покрытие 2. Политетрафторэтиленовая пленка, обратная сторона которой покрыта высокотермостойким затвердевшим силиконовым клеем.

Покрытие 3. Смесь полимерного связующего и органического растворителя, наполненная дисульфидом молибдена и поляризованным графитом.

Покрытие 4. Смесь полимерного связующего и органического растворителя, наполненная тефлоном и дисульфидом молибдена.

Покрытие 5. Двухкомпонентная антифрикционная полиуретановая эмаль.

Покрытие 6. Композиция на водной основе,

представляющая собой водную дисперсию полимеров.

Выбор материалов обусловлен положительным опытом предыдущих исследований [5]. В частности, пять покрытий из шести, возможно наносить путем распыления в несколько слоев, с промежуточной сушкой каждого слоя.

Оценка адгезии покрытий проводилась методом решетчатых надразов адгезиметром «Константа КН-1». Каждое покрытие имеет адгезию соответствующую 1 баллу, достаточную для использования на обтяжном пуансоне.

Оценка трения, возникающего в процессе обтяжки, при применении антифрикционных покрытий, проводилась сравнением коэффициента трения.

Каждое покрытие было нанесено на шесть образцов, проведено его отверждение, а затем определен коэффициент трения.

Усилие прижатия и момент трения (коэффициент трения) фиксировались каждую секунду, т.е. общее количество значений для оценки качества покрытия составляло 60 измерений. После статистической обработки результатов эксперимента был рассчитан коэффициент трения.

На рис. 3 показан график изменения коэффициента трения выбранных покрытий в процессе испытания.

Оценка износа покрытий производилась путем взвешивания на аналитических весах ВЛ-224В образцов до и после испытания. Износ каждого покрытия за один цикл механического испытания на машине трения МТУ-01 составил не более 0,004%.

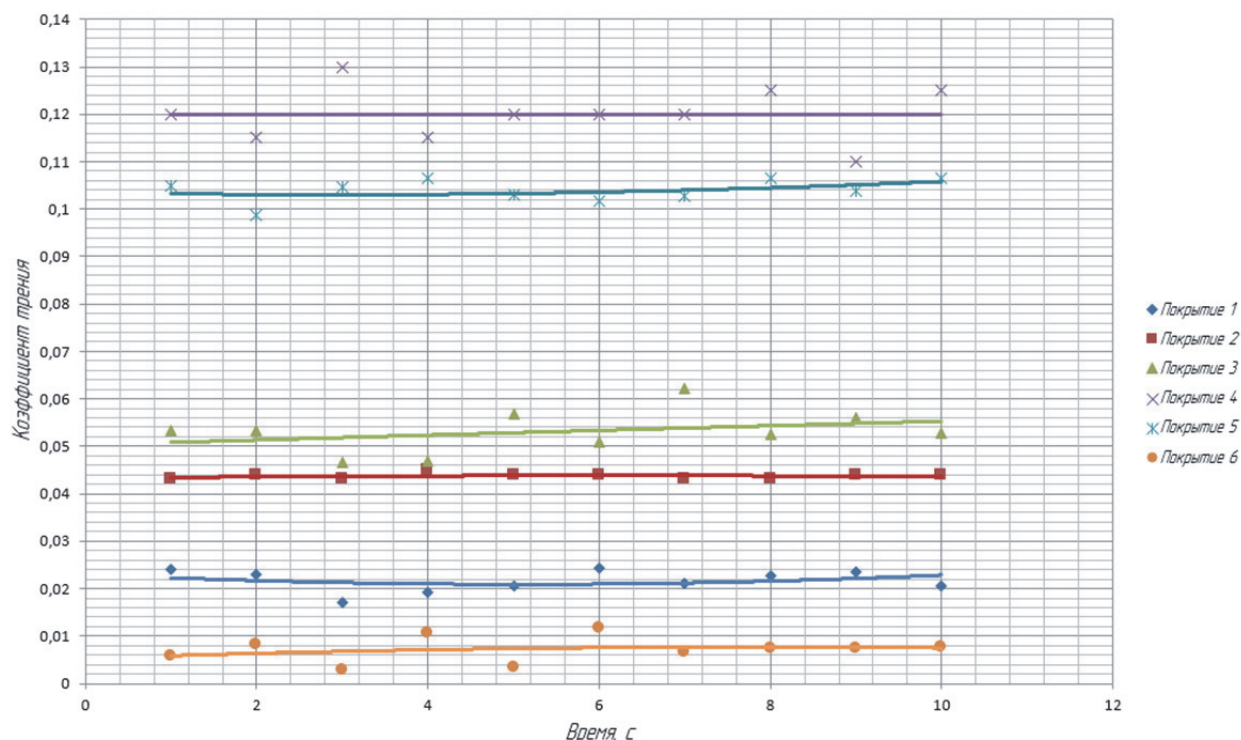


Рис. 3. Графики изменения коэффициента трения

Для выбранных покрытий – композиции на водной основе и фторполимерного лака холодного отверждения, имеющих наиболее низкий коэффициент трения 0,0084 и 0,022 соответственно, была произведена оценка влияния температуры отверждения на условную твердость. Покрытия были нанесены на стеклянные пластины для определения условной твердости покрытий на маятниковом приборе модели ТМЛ-2124. В результате для двух покрытий были построены графики изменения условной твердости в зависимости от условий формирования покрытия (времени выдержки и температуры полимеризации) (рис. 4).

В результате, было получено опытным путем, что оптимальным режимом формирования покрытия является полимеризация в течение 1 часа при температуре 80 °С. Поэтому рекомендуется производить формирование покрытий на обтяжных пуансонах с использованием крупногабаритных печей, либо инфракрасных ламп холодного нагрева.

Применение антифрикционных покрытий позволило исключить риски и царапины с внутренней стороны обшивок, что было достигнуто

при обтяжке детали «Обшивка реверса», которая имеет двойную кривизну, с выпуклыми сечениями и низким радиусом продольного сечения по формообразующему контуру, что более подробно описано в статье [1].

Дальнейшие работы коллектива авторов посвящены отработке технологии нанесения и полимеризации антифрикционных покрытий, а также получению характеристик износостойкости выбранных покрытий по результатам производственных испытаний, при обтяжке деталей различной сложности.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Карпунин Е.Г., Кошкина А.О. Оценка антифрикционных свойств покрытий обтяжных пуансонов для возможности применения при формообразовании обшивок обтяжкой на обтяжных прессах FET И FEL // В сборнике: XXIV Туполевские чтения (школа молодых ученых). Тексты докладов участников Международной молодёжной научной конференции, в 6 т.. 2019. С. 427-431.
2. Грошиков А.И. Заготовительно-штамповочные работы в самолетостроении. М.: Машиностроение, 1976. 440 с.

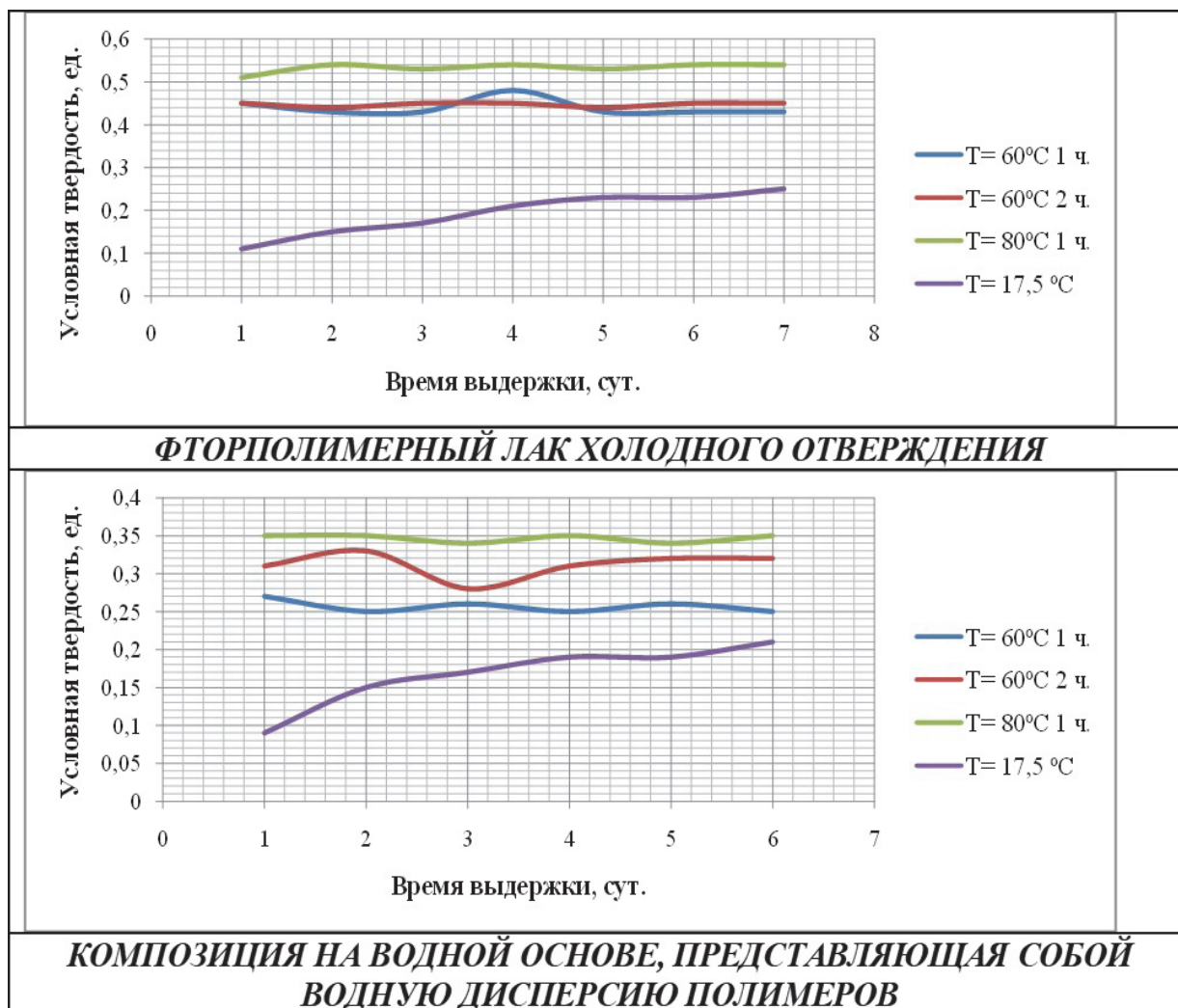


Рис. 4. Графики изменения условной твердости покрытий от условий формирования покрытия

3. ПИ 1.4.1854-88. Технология формообразования обшивок методом продольной обтяжки на растяжно-обтяжных прессах типа РО. М.: НИИТ, 1989. 138 с.
4. *Blau, P.J.* Friction science and technology : from concepts to applications. 2nd ed., 2009. Vol.436.
5. *Михеев В.А.* Разработка процессов формообразования обтяжкой обводообразующих оболочек летательных аппаратов с минимальной разнотолщинностью: дисс. ... доктора техн. наук. Самара, 2004. 338 с.
6. *Михеев В.А., Сурудин С.В.* Основы расчета процесса формообразования обтяжкой тонких оболочек двойной кривизны // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2018. Т.19. № 1(3), С. 555-562.
7. *Сурудин С.В.* Разработка способов обтяжки обводообразующих оболочек двойной кривизны применительно к прессам с программным управлением: дисс. ... канд. техн. наук. Самара, 2016. 154 с.
8. РТМ 551-16 Формообразование обшивок из высокопрочных материалов методом обтяжки. М.: НИИТ, 1957. 20 с.
9. *Еришов В.И., Глазков В.И., Каширин М.Ф.* Совершенствование формоизменяющих операций листовой штамповки. М.: Машиностроение, 1990. 312 с.
10. *Ривин Г.Л., Карпукхин Е.Г., Кошкина А.О., Дмитриенко Г.В.* Методика расчета режима исследования антифрикционных свойств покрытий обтяжных пуансонов // Известия Самарского научного центра Российской академии наук. 2018. Т.20. № 4(3), С. 414-416.
11. *Молод М. В., Максименков В. И.* Особенности проектирования и изготовления обтяжных пуансонов для формообразования обшивок канала воздухозаборника самолета // Вестник Воронежского государственного университета. 2016. Т. 12. №2. С. 113-115.
12. *Гаркунов Д.Н.* Триботехника (конструирование, изготовление и эксплуатации машин). М.: Издательство МСХА, 2002. 632 с.

**APPLICATION OF ANTIFRICTION COATINGS TO REDUCE CONTACT FRICTION  
IN STRETCH-FORMING PROCESS OF DOUBLE CURVATURE SHELLS  
ON A DIES MADE OF ALUMINUM ALLOYS**

© 2021 E.G. Karpukhin, G.L. Rivin, A.O. Koshkina

Ulyanovsk State Technical University, Ulyanovsk, Russia

The article presents the results of research on antifriction coatings for use on die made of aluminum alloys. The expediency of using antifriction coatings to reduce friction when stretch-forming of double curvature shells is justified. To substantiate this, we performed numerical modeling of the skin-tight forming process in the «LS-dyna» CAE system. According to the results of modeling, the following relationship is observed: the lower the coefficient of friction, the more evenly distributed the thinning deformations over the thickness of the blank in stretch-forming. Test modes for determining the coefficient of friction on the MTU-01 friction machine and methods for obtaining other basic functional and technological properties of antifriction coatings are described. The antifriction and technological properties of coatings, such as the coefficient of friction, adhesion, wear resistance, conditional hardness, the time and temperature of polymerization of the coating are determined.

*Ключевые слова:* stretch-forming, aircraft skins, antifriction coatings, stretch forming dies made of aluminum alloys, simulation.

DOI: 10.37313/1990-5378-2021-23-1-41-47

---

*Evgeny Karpukhin, Postgraduate Student.*

*E-mail: ew.karpukhin1@yandex.ru*

*Georgy Rivin, Candidate of Technics, Associate Professor at the «Aircraft Construction». E-mail: rgl22@rambler.ru*

*Anastasia Koshkina, Candidate of Technics, Associate Professor at the «Aircraft Construction».*

*E-mail: fallen0008@mail.ru*