

## ОПРЕДЕЛЕНИЕ ВЛИЯНИЯ ПОВЕРХНОСТНОГО НАТЯЖЕНИЯ НА МЕХАНИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА АЛЮМИНИЕВОГО СПЛАВА МЕТОДОМ КОМПЬЮТЕРНОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

**Амосов А.П.<sup>1\*</sup>, Воронин С.В.<sup>2\*\*</sup>, Лобода П.С.<sup>1\*\*\*</sup>,  
Ледяев М.Е.<sup>2\*\*\*\*</sup>, Чаплыгин К.К.<sup>2\*\*\*\*</sup>**

<sup>1</sup> Самарский государственный технический университет (СамГТУ, Самарский политех),  
ул. Молодогвардейская, 244, Самара, 443100, Россия

<sup>2</sup> Самарский национальный исследовательский университет им. академика С.П. Королева  
(Самарский университет),

Московское шоссе, 34, Самара, 443086, Россия

\* e-mail: egundor@yandex.ru

\*\* e-mail: voronin@ssau.ru

\*\*\* e-mail: stimulator90@mail.ru

\*\*\*\* e-mail: chapkostya96@mail.ru

Статья поступила в редакцию 01.10.2019

---

Кратко описаны основные факторы, влияющие на величину поверхностного натяжения твердых тел. Предложен безразмерный критерий  $\chi$ , характеризующий вклад поверхностного натяжения в прочность твердого тела. Значение  $\chi = 1$  определяет критическую толщину  $h_{cr}$  образца материала, при которой вклад поверхностного натяжения в прочность образца при растяжении становится равным вкладу объемного предела текучести. В программной среде MSC.Marc проведено компьютерное моделирование испытаний на одноосное растяжение образцов алюминиевого сплава АД1. Установлено, что при уменьшении толщины виртуальных образцов, на которых учитывалось поверхностное натяжение, происходит приращение предела текучести, в отличие от виртуальных образцов без учета сил поверхностного натяжения. Результаты данного исследования позволяют оценить влияние внешних факторов (температура, давление, ПАВ и т.д.) на величину поверхностного натяжения  $\sigma_s$ .

*Ключевые слова:* поверхностное натяжение, конечно-элементное моделирование, виртуальные испытания, увеличение предела текучести.

---

## Введение

В простейшем случае любое твердое или жидкое вещество состоит из атомов одного вида. Однако силы взаимодействия между атомами на поверхности и в объеме фазы различны. Поверхностный атом может иметь от трех до девяти ближайших соседей, и соответственно этому его энергия увеличивается на величину, пропорциональную числу отсутствующих связей, в отличие от атома внутри решетки, имеющего 12 соседей в ГЦК- и ГПУ-решетках и 6 в ОЦК-решетке. В силу этого энергия атомов на поверхности больше, чем энергия атомов внутри решетки, и с поверхностью кристалла должен быть связан определенный избыток энергии, зависящий от строения этой поверхности и носящий название поверхностного натяжения, или поверхностной энергии [1].

Поверхностная энергия оказывает значительное влияние на результаты расчетов прочностных характеристик лопаток двигателей [2, 3]. В том числе и лопаток, изготовленных методами аддитивных технологий [4], где помимо энергии поверхностного натяжения, возникающей на поверхности изделия, огромную роль играет поверхностная энергия самих частиц [5, 6]. Учет поверхностного натяжения необходим при расчете ресурса подшипников скольжения авиационной техники [7]. Нередко поверхностная энергия определяется в двухкомпонентных системах для учета взаимодействия фаз в расплавах [8, 9].

По мнению Л.Д. Ландау и А.Я. Гохштейна, поверхностное натяжение – это тангенциальная сила, приложенная к единице длины контура, ограничивающего некоторую область поверхности раздела [10] и стремящаяся деформировать твердое тело [11]. Поэтому поверхностное натяжение должно оказывать влияние на механические свойства материала.

Величина свободной поверхностной энергии является функцией состояния поверхности и зависит от состава, температуры и давления окружающей атмосферы [1].

Газовая среда, в зависимости от её состава и давления, может вызывать как упрочнение, так и разупрочнение поверхности [12, 13]. Поверхностная энергия имеет значительное влияние на механические свойства материала: прочности на разрыв, усталость, ползучесть, излом [14]. При увеличении давления наблюдается уменьшение величины поверхностной энергии [15].

При увеличении температуры усиливается тепловое движение молекул, что приводит к ослабе-

ванию сил межмолекулярного взаимодействия и снижению внутреннего давления. Одновременно с этим происходит увеличение давления насыщенного пара, что приводит к росту концентрации молекул в газовой фазе и, как следствие, уменьшению нескомпенсированности сил на поверхности раздела фаз. Таким образом, с повышением температуры поверхностное натяжение всегда уменьшается. Подобное явление наблюдается как на тонких материалах, так и на монокристаллах [16].

Любая свободная поверхность твердого тела всегда покрыта тончайшей пленкой какого-либо вещества, содержащегося в окружающей среде и обладающего наибольшим сродством к данному твердому телу. Такими веществами могут быть различные газы или пары воды, обычно находящиеся в воздухе, а также специально вводимые в окружающую среду вещества. Молекулы веществ, покрывающих поверхность твердого тела, т.е. адсорбированных твердым телом, обладают способностью двигаться по этой поверхности и перемещаться из мест, где их избыток, в места, где их недостаточно для полного покрытия поверхности. Стремление адсорбированного слоя занять всю доступную ему поверхность твердого тела объясняется тем, что в результате адсорбции происходит понижение поверхностной энергии тела (эффект Ребиндера). Вещества, которые могут адсорбироваться на поверхности твердого тела, называются поверхностно-активными. Для металлов сильными поверхностно-активными веществами (ПАВ) являются различные органические спирты и кислоты, а также соли этих кислот, т.е. мыла [11].

Рассмотренные выше факторы влияют на величину поверхностного натяжения. В свою очередь, данный параметр оказывает влияние на механические свойства материала.

Для расплавов существует множество способов определения поверхностного натяжения (методы максимального давления в газовом пузыре, неподвижной капли, капиллярного поднятия, висящей капли, отрыва кольца или пластинки и т.д.) [17]. Однако на сегодняшний день недостаточно информации о влиянии поверхностного натяжения на механические свойства металлов в твердом состоянии.

Определение зависимости механических свойств от величины поверхностного натяжения в условиях натурального эксперимента является достаточно трудоемким.

Поэтому цель данного исследования — определить степень влияния поверхностного натяжения в алюминиевом сплаве на механические свойства методом конечно-элементного моделирования.

Для достижения поставленной цели были сформулированы следующие задачи:

1. Вывести упрощенные формулы для определения необходимых геометрических параметров виртуальных образцов, учитывающие действие сил поверхностного натяжения в направлении, противоположном растяжению.

2. Построить конечно-элементные модели (КЭМ) образцов с учетом сил поверхностного натяжения в направлении, противоположном растяжению, и без учета действия сил поверхностного натяжения и провести виртуальные испытания на одноосное растяжение для определения предела текучести.

3. Построить КЭМ образцов, приближенные к реальным условиям воздействия поверхностного натяжения, и повторно оценить уровень механических свойств образца.

#### Определение критической толщины образца алюминиевого сплава АД1 для моделирования испытаний на одноосное растяжение

За характеристику прочности материала твердого тела был принят предел текучести  $\sigma_y$ . Рассмотрим растяжение полосы с размерами: длина  $a$ , ширина  $b$ , толщина  $h$  (рис. 1). При построении КЭМ плоского прямоугольного образца была принята схема приложения нагрузок, имитирующая поверхностное натяжение, к ребрам образца, так как силы поверхностного натяжения противодействуют увеличению площади поверхности [11]. При выводе последующих формул было принято допущение, что силы поверхностного натяжения  $F_s$  прикладываются к плоскому образцу

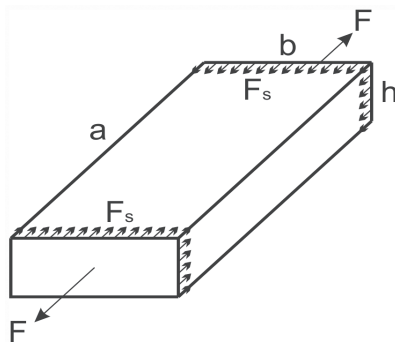


Рис. 1. Воздействие моделируемых сил на прямоугольную пластину длиной  $a$ , шириной  $b$ , толщиной  $h$

только в направлении, противоположном растяжению.

Таким образом, сила растяжения, при которой материал полосы достигает предела текучести с учетом сил поверхностного натяжения, имеет вид:

$$F = F_y + F_s = \sigma_y bh + \sigma_s 2(b+h),$$

где  $\sigma_s$  — поверхностное натяжение, Н/м;

$F_y = \sigma_y bh$  — сила объемного сопротивления, обусловленная обычным объемным пределом текучести без учета сил поверхностного натяжения, Н.

Отношение  $F_s / F_y$  можно принять за безразмерный критерий  $\chi$ , характеризующий вклад поверхностного натяжения в прочность твердого тела:

$$\chi = \frac{\sigma_s 2(b+h)}{\sigma_y bh} = 2 \frac{\sigma_s}{\sigma_y} \left( \frac{1}{h} + \frac{1}{b} \right). \quad (1)$$

Вклад поверхностного натяжения становится сравним с объемным пределом текучести при  $\chi \sim 1$ . Из формулы (1) видно, что критерий  $\chi$  увеличивается при уменьшении толщины полосы и превращении ее в фольгу.

В случае фольги  $h \ll b$ ,  $1/h \gg 1/b$  и

$$\chi = 2 \frac{\sigma_s}{\sigma_y} \frac{1}{h} = \frac{2\sigma_s}{\sigma_y h}.$$

Отсюда получаем критическое значение толщины фольги, при которой вклад поверхностного натяжения становится сравним с объемным пределом текучести

$$h_{cr} = \frac{2\sigma_s}{\sigma_y}. \quad (2)$$

При малых толщинах  $h \ll h_{cr}$  вклад поверхностного натяжения в прочность твердого тела превышает вклад объемного предела текучести, а при больших толщинах  $h \gg h_{cr}$ , наоборот, вкладом поверхностного натяжения можно пренебречь.

По формуле (2) для различных металлов с учетом справочных данных при нормальных условиях (давление 760 мм рт.ст., температура — 20 °С, естественная газовая среда, отсутствие жидких ПАВ) [18, 19] была определена критическая толщина, при которой вклад сил поверхностного натяжения становится соизмерим с объемным пределом текучести ( $\chi = 1$ ). Результаты приведены в табл. 1, где указаны значения удельной сво-

Таблица 1

Критическая толщина образцов  
для некоторых металлов при  $\chi = 1$

Металл	$E_s(\sigma)$ , Н/м	$\sigma_y$ , МПа	$h_{cr}$ , нм
Al	1,14	31	73,54
Cu	1,75	340	10,29
Fe	1,90	40	95
Ni	1,82	70	51
Nb	2,10	270	15,56

бодной поверхностной энергии  $E_s(\sigma)$ , численно равные поверхностному натяжению  $\sigma_s$ .

Таким образом, для технически чистого алюминия критическая толщина образца, при которой вклад сил поверхностного натяжения становится сопоставим с объемным пределом текучести, равна 73,5 нм.

#### Проведение виртуальных испытаний на одноосное растяжение для определения предела текучести

Исследование механических свойств алюминиевого сплава проводилось в программной среде MSC.Marc [21], основанной на методе конечных элементов. Сравнивались КЭМ образцов с учетом и без учета поверхностного натяжения. Длина модели 730 мкм, ширина 150 мкм, толщина варьировалась от 73,5 до 735 нм. Все КЭМ состояли из постоянного количества элементов: по толщине 10, по ширине 20, по длине 100 шт. Суммарное количество элементов составило 20 тыс. шт. Конечные элементы представляли собой одинаковые параллелепипеды с восемью уз-

лами и восемью точками интегрирования, что позволило решать объемную задачу с малыми пластическими деформациями.

Моделям задавались свойства алюминиевого сплава АД1 в отожженном состоянии: модуль упругости 7100 МПа, коэффициент Пуассона 0,3. Была выбрана упруго-пластическая изотропная модель материала. Для описания текучести материала использовался критерий текучести по Мизесу. Для учета влияния упрочнения при холодной пластической деформации использовалась диаграмма упрочнения в виде кусочно-линейной функции.

Удельная поверхностная энергия алюминия  $E_s$  равна 1,14 Н/м [18]. Справочное значение поверхностной энергии пересчитывалось в единицы силы, распределенной по длинам ребер образцов. К контурам КЭМ плоского образца прикладывалась нагрузка, имитирующая силу поверхностного натяжения на гранях образца, в соответствии с рис. 1. Задача решалась в нелинейной постановке.

Полученный ряд КЭМ образцов с разной толщиной, при неизменных длине и ширине, подвергался одноосному растяжению с усилиями, вызывающими напряжение 50 МПа, что превышает объемный предел текучести для данного сплава, но не превышает его предел прочности. Виртуальные испытания выполнялись за 10 шагов. Затем, по разработанной ранее методике [20], строились виртуальные диаграммы растяжения; по этим диаграммам сравнивались пределы текучести КЭМ образцов с учетом и без учета сил поверхностного натяжения, по которым оценивалась величина приращения предела текучести. На рис. 2 показана диаграмма растяжения КЭМ образцов с толщиной, равной  $2h_{cr}$ .

По аналогичным диаграммам были выявлены приращения пределов текучести в КЭМ образцов

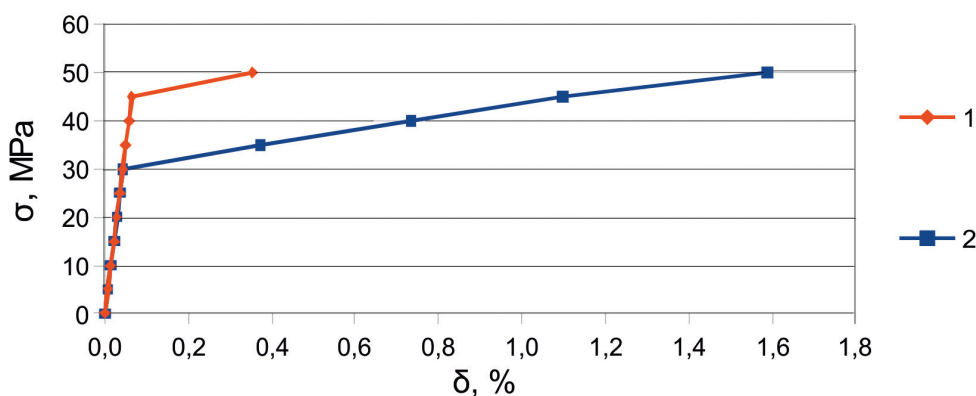


Рис. 2. Диаграмма растяжения КЭМ образцов с учетом действия сил поверхностного натяжения, приложенных в направлении, противоположном растяжению (1), и без учета данных сил (2), при толщине  $2h_{cr}$ .

для толщин, кратных критической 73,5 нм. Результаты сведены в табл. 2.

По данным таблицы был построен график приращений предела текучести в образцах с различной толщиной, кратной критическому значению  $h_{cr} = 73,5$  нм, при учете сил поверхностного натяжения (рис. 3).

кучести при задании сил поверхностного натяжения на всех гранях КЭМ, на всех плоскостях (рис. 4), что приближает к реальным условиям воздействия поверхностного натяжения.

По аналогичной методике был проведен расчет КЭМ образцов с такими же геометрическими параметрами. Однако нагрузка, имитирующая

Таблица 2

Приращение пределов текучести КЭМ образцов с учетом поверхностного натяжения

Толщина образца	$10 h_{cr}$	$8 h_{cr}$	$6 h_{cr}$	$4 h_{cr}$	$2 h_{cr}$	$h_{cr}$
Приращение, %	+9,95	+12,29	+15,05	+23,89	+46,41	+100

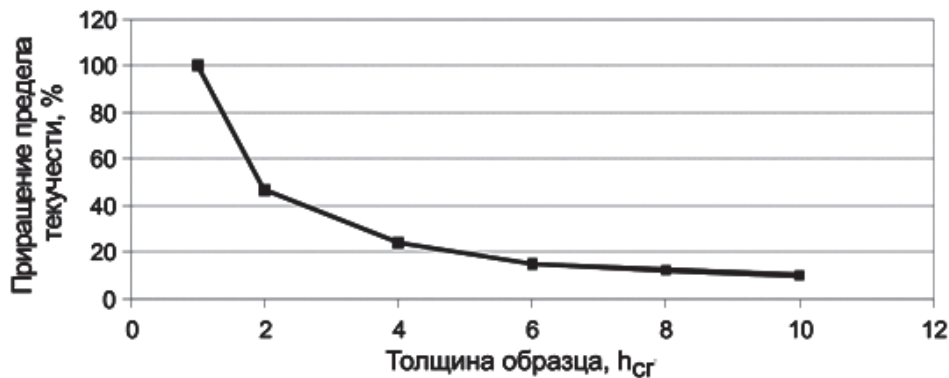


Рис. 3. График зависимости приращения предела текучести от толщины образца с учетом действия сил поверхностного натяжения в двух направлениях КЭМ образцов с различной толщиной

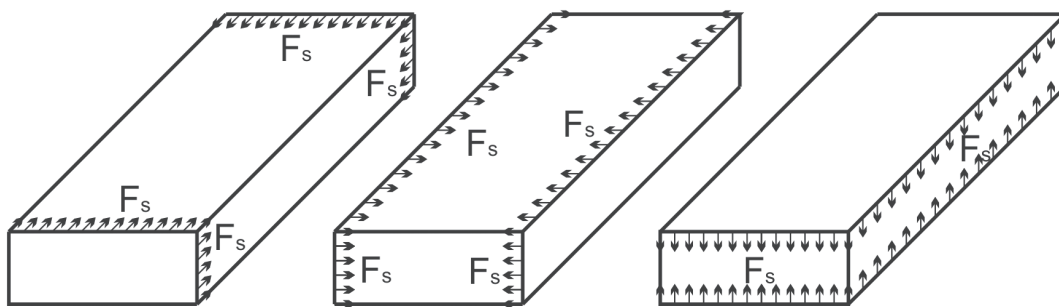


Рис. 4. Направление воздействия сил поверхностного натяжения на КЭМ

Таким образом, было определено влияние поверхностного натяжения на механические свойства моделей образцов, которое подтвердило, что существенный вклад сил поверхностного натяжения наблюдается только на образцах малой толщины, сопоставимой с критической.

Поскольку КЭМ с двумя гранями приложения сил поверхностного натяжения имеет высокую сходимость с математической моделью, было необходимо оценить степень прироста предела те-

силу поверхностного натяжения, прикладывавалась во всех направлениях (рис. 4).

Результаты измерения пределов текучести в КЭМ образцов с различной толщиной сведены в табл. 3.

По данным таблицы был построен график приращения пределов текучести образцов с различной толщиной при учете действия сил поверхностного натяжения на всех ребрах КЭМ (рис. 5).



Таблица 3

Результаты измерений пределов текучести в КЭМ

Толщина образца	$10 h_{cr}$	$8 h_{cr}$	$6 h_{cr}$	$4 h_{cr}$	$2 h_{cr}$	$h_{cr}$
Приращение, % (при двух направлениях)	+9,95	+12,29	+15,05	+23,89	+46,41	+100
Приращение, % (при всех направлениях)	+4,06	+5,74	+7,98	+11,49	+16,49	+36,66

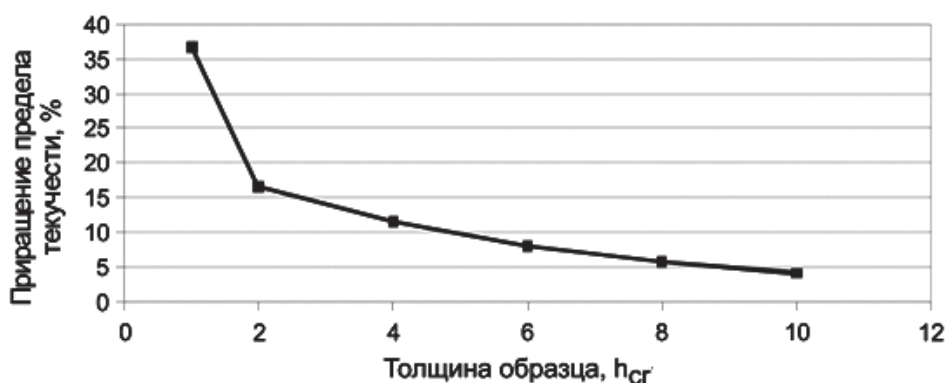


Рис. 5. График зависимости приращения предела текучести от толщины образца с учетом действия сил поверхностного натяжения во всех направлениях КЭМ образцов с различной толщиной

## Выводы

В результате исследования были выведены упрощенные формулы, учитывающие силы поверхностного натяжения, действующие только в направлении, противоположном растяжению для определения геометрических параметров образцов, при которых влияние сил поверхностного натяжения сопоставимо с объемным пределом текучести материала.

В упрощенной задаче конечно-элементного анализа при учете сил поверхностного натяжения, действующих только в направлении, противоположном растяжению, при толщине 735 нм приращение предела текучести составило 9,95% по сравнению с КЭМ образца без учета поверхностного натяжения. При уменьшении толщины приращение предела текучести продолжало увеличиваться и на критической толщине 73,5 нм составило 100%.

С учетом поперечных сил поверхностного натяжения при толщине 735 нм приращение предела текучести составило 4,06% по сравнению с моделями образца без учета поверхностного натяжения. При уменьшении толщины приращение предела текучести продолжало увеличиваться и на толщине 73,5 нм составило 36,66%.

Таким образом, было подтверждено, что существенный вклад сил поверхностного натяжения наблюдается только на образцах малой толщины, сопоставимой с критической.

## Библиографический список

1. Скоров Д.М., Дашковский А.И, Маскалец В.Н., Хиженый В.К. Поверхностная энергия твердых металлических фаз. — М.: Атомиздат, 1973. — 172 с.
2. Эзрохи Ю.А., Каленский С.М., Морзеева Т.А., Хорева Е.А. Учет влияния пограничного слоя на входе в вентиляторы при интеграции распределенной силовой установки и летательного аппарата // Вестник Московского авиационного института. 2018. Т. 25. № 1. С. 57-66.
3. Ночовная Н.А., Никитин Я.Ю., Савушкин А.Н. Исследование изменения свойств поверхности лопаток из титанового сплава после химической очистки от углеродсодержащих загрязнений // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 1. С. 236-243.
4. Алексеев В.В., Бобров А.Н., Калугин К.С. Исследование комплексных прочностных характеристик моделей газовых турбин, изготовленных аддитивными методами // Вестник Московского авиационного института. 2019. Т. 26. № 2. С. 43-50.
5. Самсонов В.М., Чернышова А.А., Сдобняков Н.Ю. О размерной зависимости поверхностной энергии и

- поверхностного натяжения металлических наночастиц // Известия российской академии наук. Серия: Физическая. 2016. Т. 80. № 6. С. 768. DOI: 10.7868/S0367676516060296
6. *Каширин Н.В., Калинина В.В.* Экспериментальное исследование коэффициента поверхностного натяжения в водной суспензии микрочастиц канифоли // Физико-математическое и естественнонаучное образование: наука и школа: материалы Всероссийской научно-практической конференции. Под ред. В.А. Белянина, Н.Л. Курилевой. — Йошкар-Ола: Марийский государственный университет, 2018. С. 95-98.
  7. *Паровой Е.Ф.* Моделирование сегментного подшипника скольжения с учетом многофазности рабочего тела // Насосы. Турбины. Системы. 2016. № 3(20). С. 80-85.
  8. *Конашков В.В., Вьюхин В.В., Латыпова А.И.* Исследования по определению кинематической вязкости и плотности двухкомпонентных систем Со-В // Аэрокосмическая техника, высокие технологии и инновации. 2015. Т. 1. С. 121-125.
  9. *Зайцева Е.С., Товбин Ю.К.* Размерные характеристики поверхностного натяжения одно- и двухкомпонентных расплавов металлов // Физикохимия поверхности и защита материалов. 2018. Т. 54. № 5. С. 415-419. DOI: 10.1134/S0044185618050248
  10. *Ландау Л.Д., Лифшиц Е.М.* Статистическая физика. Т.5 // Теоретическая физика: Учеб. пособ. для вузов: В 10 т.. — 5-е изд., стереот. — М.: Физматлит, 2002. Ч. 1. — 616 с.
  11. *Гохштейн А.Я.* Поверхностное натяжение твердых тел и адсорбция. — М.: Наука, 1976. — 400 с.
  12. *Алехин В.П., Шоршоров М.Х.* Особенности микропластического течения в приповерхностных слоях материалов и их влияние на общий процесс макропластической деформации. — М.: Препринт / АН СССР. Ин-т металлургии им. А.А. Байкова, 1973. — 81 с.
  13. *Бокштейн С.З., Бронфин М.Б.* Процесс сублимаций и влияние вакуума на механические свойства металлов. — М.: Машиностроение, 1973. — 33 с.
  14. *Kramer I.R.* Effect of Surfaces on Mechanical Behavior of Metals // Bonis L.J., de Bruyn P.L., Duga J.J. (eds) Surface Phenomena. Fundamental Phenomena in the Materials Sciences. Springer, Boston, MA, 1966, pp.171-193. DOI: 10.1007/978-1-4899-6347-5\_10
  15. *Kramer I.R., Podlaseck S.E.* Stress-Strain Behavior of Aluminium Crystals at Low Pressure // Acta Metallurgical. 1963. Vol. 11. No. 1, pp. 70-71.
  16. *Сергеев И.Н., Бжухатлов К.Ч., Шебзухов А.А.* Поверхностная сегрегация и поверхностное натяжение грани (100) монокристаллов Cu-Al и Cu-Mn при различных температурах // Известия Кабардино-Балкарского государственного университета. 2015. Т. 5. № 3. С. 5-9.
  17. *Арсентьев П.П., Яковлев В.В., Крашенинников М.Г., Пронин Л.А., Филипов Е.С.* Физико-химические методы исследования металлургических процессов: Учебник для вузов. — М.: Металлургия, 1988. — 509 с.
  18. *Олешко В.С., Пиговкин И.С.* Оперативное определение поверхностной энергии металлических деталей авиационной техники // Интернет-журнал «Науковедение». 2016. Т. 8. № 3(34). URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/131EVN316.pdf>
  19. *Золоторевский В.С.* Механические свойства металлов: Учебник для вузов. — 3-е изд., перераб. и доп. — М.: МИСИС, 1998. — 398 с.
  20. *Воронин С.В., Лобода П.С., Ледяев М.Е.* Определение оптимальной пористой структуры с целью повышения удельных механических свойств алюминиевого сплава // Вестник Московского авиационного института. 2016. Т. 23. № 4. С. 164-173.
  21. MSC Software: Nonlinear Finite Element Analysis of Elastomers. URL: [http://d3e9xuvpzilisd.cloudfront.net/cdn/farfuture/TGjBPbsxO5PZ4cIoljWYi4g8FMJTB1Ag6cGGDQyH0Jg/mtime:1404846593/sites/default/files/wp\\_elastomer\\_ltr\\_w\\_0.pdf](http://d3e9xuvpzilisd.cloudfront.net/cdn/farfuture/TGjBPbsxO5PZ4cIoljWYi4g8FMJTB1Ag6cGGDQyH0Jg/mtime:1404846593/sites/default/files/wp_elastomer_ltr_w_0.pdf)

## DETERMINING SURFACE TENSION EFFECT ON ALUMINUM ALLOY MECHANICAL PROPERTIES BY COMPUTER SIMULATION TECHNIQUE

**Amosov A.P.<sup>1\*</sup>, Voronin S.V.<sup>2\*\*</sup>, Loboda P.S.<sup>1\*\*\*</sup>,  
Ledyayev M.E.<sup>2\*\*\*</sup>, Chaplygin K.K.<sup>2\*\*\*\*</sup>**

<sup>1</sup> Samara State Technical University (Samara Polytech),  
244, Molodogvardeyskaya str., Samara, 443100, Russia

<sup>2</sup> Samara National Research University named after academician S.P. Korolev  
(Samara University),

34, Moskovskoe shosse, Samara, 443086, Russia

\* e-mail: egundor@yandex.ru

\*\* e-mail: voronin@ssau.ru

\*\*\* e-mail: stimulator90@mail.ru

\*\*\*\* e-mail: chapkostya96@mail.ru

### Abstract

In the simplest case, any solid or liquid substance consists of atoms of the same type. A surface atom can have from three to nine nearest neighbors, and accordingly its energy increases by the amount, proportional to the number of missing bonds, compared to an atom inside the lattice. By virtue of this, the energy of the atoms on the surface is greater than the energy of the atoms inside the lattice. Thus, a certain excess of energy must be associated with the crystal surface, depending on the structure of this surface and called a surface tension, or surface energy.

According to L.D. Landau and A.Ya. Hohstein opinion, the surface tension is a tangential force applied to a unit length of the contour, limiting a certain area of the interface, and tended to deform a solid. Thus, the surface tension should affect the mechanical properties of the material.

The presented article proposes a dimensionless criterion  $\chi$ , characterizing the surface tension

contribution to the strength of a solid:  $\chi = \frac{2\sigma_s}{\sigma_y h}$ , where

$\sigma_s$  is the surface tension, N/m,  $\sigma_y$  is the conventional volumetric yield stress of the solid material, and MPa;  $h$  is the thickness of a sample in the form of a strip (foil) of a solid. The value  $\chi = 1$  determines the critical thickness  $h_{cr}$  of the material sample at which contribution of the surface tension to the tensile strength of the sample becomes equal to the contribution of the bulk yield strength.

The CEM of the samples were also being compared in this work with and without accounting

for the surface tension. Mechanical properties of aluminum alloy were studied with the MSC.Marc software based on the finite element method. The total number of elements was 20 thousand pieces. The finite elements represented identical parallelepipeds with eight nodes and eight integration points, which allowed solve volumetric problem with small plastic deformations. The properties of the ADT aluminum in the annealed state were being set to the models.

The obtained series of CEM samples with various thicknesses, with constant length and width, were subjected to the uniaxial tension with forces causing a stress of 50 MPa, which exceeded the bulk yield stress for this alloy, but did not exceed its tensile strength. Thus, the surface tension impact on the mechanical properties of sample models was determined, which confirmed the fact that a significant contribution of surface tension forces was observed only on samples of small thickness, comparable to the critical one.

As the result of the study, simplified equations, accounting for the surface tension forces acting only in the direction, opposing tension, for determining geometric parameters of the samples at which the influence of surface tension forces was comparable with the bulk yield strength of the material, were derived. Based on the derived dependencies for the aluminum alloy, the critical thickness of the sample was determined equal to 73.5 nm.

The results of this study allow accounting for other factors impact, such as temperature, pressure, surfactant, etc., by accounting for their effect on the surface tension magnitude.



**Keywords:** surface tension, finite element modeling, virtual tests, yield strength increasing.

## References

1. Skorov D.M., Dashkovskii A.I., Maskalets V.N., Khizhnyi V.K. *Poverkhnostnaya energiya tverdykh metallicheskih faz* (Surface energy of solid metallic phases), Moscow, Atomizdat, 1973, 172 p.
2. Ezrokhi Yu.A., Kalenskii S.M., Morzeeva T.A., Khoreva E.A. Accounting for the effect of the border layer at the inlet to the fans while integrating the distributed power plant and a flying vehicle. *Aerospace MAI Journal*, 2018, vol. 25, no. 1, pp. 57-66.
3. Nochovnaya N.A., Nikitin Ya.Yu., Savushkin A.N. Exploring the properties changes of the titanium alloy blades surface after chemical cleaning from carbonaceous impurities. *Aerospace MAI Journal*, 2019, vol. 26, no. 1, pp. 236-243.
4. Alekseev V.V., Bobrov A.N., Kalugin K.S. Study of complex strength characteristics of gas turbine odels fabricated by additive methods. *Aerospace MAI Journal*, 2019, vol. 26, no. 2, pp. 43-50.
5. Samsonov V.M., Chernyshova A.A., Sdobnyakov N.Y. Size dependence of the surface energy and surface tension of metal nanoparticles. *Bulletin of the Russian Academy of Sciences: Physics*, 2016, vol. 80, no. 6, pp. 698-701. DOI: 10.3103/S1062873816060290
6. Kashirin N.V., Kalinina V.V. *Materialy Vserossiiskoi nauchno-prakticheskoi konferentsii "Fiziko-matematicheskoe i estestvennonauchnoe obrazovanie: nauka i shkola"*. Ioshkar-Ola, Mariiskii gosudarstvennyi universitet, 2018, pp. 95-98.
7. Parovai E.F. *Nasosy. Turbiny. Sistemy*, 2016, no. 3(20), pp. 80-85.
8. Konashkov V.V., V'yukhin V.V., Latypova A.I. *Aerokosmicheskaya tekhnika, vysokie tekhnologii i innovatsii*, 2015, vol. 1, pp. 121-125.
9. Zaitseva E.S., Tovbin Y.K. Size Characteristics of the Surface Tension of One- and Two-Component Metal Melts. *Protection of Metals and Physical Chemistry of Surfaces*, 2018, vol. 54, no. 5, pp. 749-753. DOI: 10.1134/S2070205118050246
10. Landau L.D., Lifshits E.M. T. 5. *Statisticheskaya fizika* (Vol. 5. Statistical physics), Moscow, Fizmatlit, 2002. Part 1, 616 p.
11. Gokhshtein A.Ya. *Poverkhnostnoe natyazhenie tverdykh tel i adsorbtsiya* (Surface tension of solids and adsorption), Moscow, Nauka, 1976, 400 p.
12. Alekhin V.P., Shorshorov M.Kh. *Osobennosti mikroplasticheskogo techeniya v pripoverkhnostnykh sloyakh materialov i ikh vliyanie na obshchii protsess makroplasticheskoi deformatsii* (Microplastic flow features in the near-surface layers of materials and their impact on the overall process of macroplastic deformation), Moscow, AN SSSR. Institut metallurgii im. A.A. Baikova, 1973, 81 p.
13. Bokshtein S.Z., Bronfin M.B. *Protsess sublimatsii i vliyanie vakuuma na mekhanicheskie svoystva metallov* (Sublimation process and vacuum impact on mechanical properties of metals), Moscow, Mashinostroenie, 1973, 33 p.
14. Kramer I.R. Effect of Surfaces on Mechanical Behavior of Metals. In: Bonis L.J., de Bruyn P.L., Duga J.J. (eds) *Surface Phenomena. Fundamental Phenomena in the Materials Sciences*. Springer, Boston, MA, 1966, pp.171-193. DOI: 10.1007/978-1-4899-6347-5\_10
15. Kramer I.R., Podlaseck S.E. Stress-Strain Behavior of Aluminium Crystals at Low Pressure. *Acta Metallurgical*, 1963, vol. 11, no. 1, pp.70-71.
16. Sergeev I.N., Bzhikhatlov K.Ch., Shebzukhov A.A. *Izvestiya Kabardino-Balkarskogo gosudarstvennogo universiteta*, 2015, vol. 5, no. 3, pp. 5-9.
17. Arsent'ev P.P., Yakovlev V.V., Krashenninnikov M.G., Pronin L.A., Filipov E.S. *Fiziko-khimicheskie metody issledovaniya metallurgicheskikh protsessov* (Physico-chemical methods of studying metallurgical processes), Moscow, Metallurgiya, 1988, 509 p.
18. Oleshko V.S., Pigovkin I.S. *Internet-zhurnal "NAUKOVEDENIE"*, 2016, vol. 8, no. 3(34). URL: <http://naukovedenie.ru/PDF/131EVN316.pdf>
19. Zolotarevskii V.S. *Mekhanicheskie svoystva metallov* (Mechanical properties of metals), Moscow, MISIS, 1998, 398 p.
20. Voronin S.V., Loboda P.S., Ledyayev M.E. Optimal porous structure determination to improve aluminum alloy mechanical properties. *Aerospace MAI Journal*, 2016, vol. 23, no. 4, pp. 164-173.
21. *MSC Software: Nonlinear Finite Element Analysis of Elastomers*. URL: [http://d3e9xuvpzi1isd.cloudfront.net/cdn/farfuture/TGjBPbsxO5PZ4cIoIjWYi4g8FMJTB1Ag6cGGDQyH0Jg/mtime:1404846593/sites/default/files/wp\\_elastomer\\_ltr\\_w\\_0.pdf](http://d3e9xuvpzi1isd.cloudfront.net/cdn/farfuture/TGjBPbsxO5PZ4cIoIjWYi4g8FMJTB1Ag6cGGDQyH0Jg/mtime:1404846593/sites/default/files/wp_elastomer_ltr_w_0.pdf)

Редактор *Е.В. Дмитриева*  
Художественное оформление *В.И. Володиной, И.В. Романовой*  
Компьютерная верстка *О.Г. Лавровой*

Сдано в набор 24.03.2020. Подписано в печать 29.05.2020.  
Бумага офсетная. Формат 60×84 1/8. Печать цифровая.  
Усл. печ. л. 26,04. Уч.-изд. л. 28,00. Тираж 120 экз. Заказ .

Издательство МАИ  
(МАИ), Волоколамское ш., д. 4, Москва, А-80, ГСП-3 125993  
Типография Издательства МАИ  
(МАИ), Волоколамское ш., д. 4, Москва, А-80, ГСП-3 125993

