

Известно, что основной технологией, используемой для полимеризации связующего, является отверждение под ИК-лампой, в печи и под прессом [1]. Существенные отличия в различных свойствах матрицы и армирующего наполнителя, усадка полимерной матрицы, которая происходит в процессе отверждения связующего и термические напряжения могут послужить причиной возникновения остаточных напряжений [2]. Все эти факторы приводят к возникновению в ПКМ необратимых деформаций, которые вызывают появление дополнительных остаточных напряжений.

Соответственно кинетика процесса существенно зависит от разнотолщинности конструкции или детали из композиционного материала, времени, скорости и способа подвода тепла, используемого материала оснастки и др. [3].

Низкая теплопроводность большинства полимерных КМ решает достаточно сложную задачу обеспечения равномерности температурного поля по толщине изделия при отверждении и приводит к появлению неоднородных напряжений [4].

Цель исследования – изучить влияние толщины детали на кинетику процесса отверждения деталей из полимерных композиционных материалов на основе эпоксидного связующего для оптимизации технологических режимов полимеризации.

Для получения значений тепловыделения и рассмотрения процесса отверждения детали был произведен эксперимент, заключающийся в разогреве связующего в стаканах, с различной высотой столба жидкости (10, 20, 40 мм). Весь процесс был зафиксирован на тепловизор, и были получены значения разницы температур при отверждении образцов.

В испытании было использовано связующее Т20 – 60 с прилагаемым к нему отвердителем. Соотношение связующего к отвердителю по паспорту было заложено 100:31,6.

На образце с высотой жидкости 20 мм произошел перегрев и связующее вскипело, что наглядно показывают появившиеся в объеме пузыри. В процессе отверждения было замечено, что полимеризация не происходит во всём объеме одновременно. Было видно, как тепло передается сверху вниз по объему жидкости и на верхних слоях, которые более прогреты, процесс полимеризации начинался быстрее, в отличие от остальных лежащих вглубь слоев. Для изучения этого явления был проведен еще один эксперимент в такой же форме, но с высотой столба связующего в 20 и 40 мм.

В ходе исследования было выявлено, что подобный процесс может протекать и без внешней подачи тепла – в процессе замешивания смолы с отвердителем при пропитке изделия получившимся связующим.

Исходя из вышеизложенного рекомендуется распределять связующее в большом объеме при минимальной высоте столба жидкости, чтобы избежать вскипания.

Список литературы

- 1 **Панов, Ю. Т.** Современные методы переработки полимерных материалов. Переработка реактопластов : учеб. пособие / Ю. Т. Панов, Л. А. Чижова, Е. В. Ермолаева. – Владимир : ВлГУ, 2014. – 144 с.
- 2 Современные технологии получения и переработки полимерных и композиционных материалов : учеб. пособие / В. Е. Галыгин, Г. С. Баронин, В. П. Таров, Д. О. Завражин. – Тамбов : ТГТУ, 2012. – 180 с.
- 3 **Чукин, А. В.** Проверка законов теплового излучения / А. В. Чукин. – URL: <http://www.urfu.ru> (дата обращения: 25.07.2025).
- 4 **Кулик, В. И.** Связующие для полимерных композиционных материалов : учеб. пособие / В. И. Кулик, А. С. Нилов. – СПб. : Изд-во БГТУ, 2019. – 52 с.

УДК 004.94:656.073

ВЛИЯНИЕ ХАРАКТЕРИСТИК ПЕРЕВОЗИМЫХ ВО ФЛЕКСИТАНКАХ ЖИДКИХ ГРУЗОВ НА ДИНАМИКУ ИХ ОТНОСИТЕЛЬНОГО ДВИЖЕНИЯ

А. А. МАРКАВЦОВ

*Конструкторско-технический центр Белорусской железной дороги, г. Минск
Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель*

В настоящее время увеличиваются объемы мультимодальных перевозок жидких грузов с использованием стандартных контейнеров, оснащенных эластичными вкладышами (флекситанками), что объясняется более простой организацией их доставки на длительные расстояния с использованием нескольких видов транспорта по сравнению с традиционными дорогостоящими танк-контейнерами и вагонами-цистернами. Безопасность таких перевозок напрямую зависит от динамических нагрузок от

жидкости на стенки контейнера в процессе транспортировки. Это обусловлено возможностью относительного смещения жидкого груза внутри резервуара, которое может вызывать множественные гидроудары, влияющие на устойчивость и управляемость транспортного средства [1–3].

Анализ исследований различных авторов показал, что динамика жидкостей во флекситанках представляет собой сложную научную проблему, которая до сих пор остается малоизученной, поскольку, в отличие от традиционных цистерн, где процессы относительных колебаний жидких грузов исследованы достаточно подробно, эластичная оболочка флекситанка вносит в систему дополнительные степени свободы, включая возможность смещения стенок гибкой емкости. Чем меньше степень заполнения флекситанка и вязкость жидкости, тем меньшие внешние усилия необходимо приложить для начала относительного движения транспортируемой жидкости.

Таким образом, целью представленной работы является исследование влияния плотности и вязкости жидкого груза на динамику его относительного движения внутри флекситанка с использованием программного комплекса ANSYS CFX.

Для проведения численного моделирования создана трехмерная геометрическая модель гибкого вкладыша типа «лайнер-бэг», которая в наполненном состоянии полностью повторяет внутреннюю форму стандартного 20-футового контейнера. Уровень заполнения флекситанка принимался равным 90 %.

В качестве допущений принято, что стенки флекситанка достаточно жесткие и не деформируются. Принятая высота гибкого резервуара составляет 75,2 % от высоты контейнера, что соответствует реальным условиям загрузки. Физические свойства колеблющейся внутри резервуара жидкости соответствуют параметрам плотности и вязкости глицерина, поскольку для этого груза характерно значительное (до 97 %) изменение вязкости при изменении температуры окружающей среды (таблица 1) [4].

Таблица 1 – Значения плотности и вязкости глицерина в зависимости от температуры окружающей среды при транспортировке

Температура, °C	Плотность, кг/м ³	Вязкость, Па·с	Температура, °C	Плотность, кг/м ³	Вязкость, Па·с
0	1272	12,1	20	1260	1,49
5	1269	6,22	30	1254	0,62
10	1266	3,81	40	1248	0,30

Расчеты производились в модуле CFX программного комплекса ANSYS Workbench. Рассматривалась модель экстренного торможения контейнера с замедлением, равным 4g, которая двигалась с начальной скоростью 15 м/с. Проведена серия расчетов для температуры перевозки глицерина от 0 до 40 °C.

Относительное движение жидкого груза характеризуется, в первую очередь, скоростью частиц, поэтому в качестве исследуемой характеристики выбрана кинетическая энергия глицерина. На рисунке 1, а продемонстрировано положение свободной поверхности жидкого груза в момент времени $t = 0,02$ с после начала торможения транспортного средства. Рисунок 1, б представляет графические зависимости кинетической энергии глицерина от времени, отсчитываемого от начала торможения, для различной температуры его перевозки. Во всех случаях наблюдается первоначальный резкий и значительный всплеск кинетической энергии, вызванный инерцией жидкости в самом начале процесса торможения (до 0,1 с после начала торможения). Наибольшее значение кинетической энергии, составляющее 2,66 МДж, наблюдается при температуре 20 °C в момент времени 0,02 с.

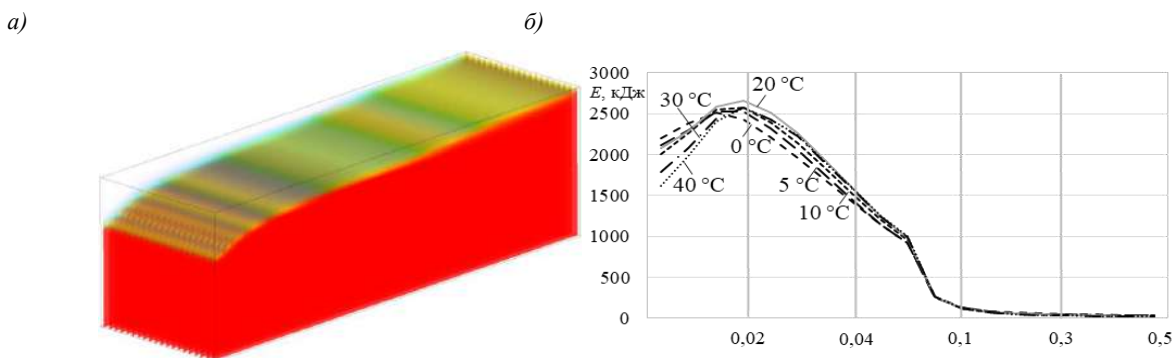


Рисунок 1 – Расчетная модель для CFD-анализа динамики глицерина:
а – положение свободной поверхности глицерина при температуре 20 °C в момент времени 0,02 с;
б – зависимость кинетической энергии от времени при различной температуре глицерина

По результатам выполненного численного моделирования сформулированы следующие выводы:

1) установлена обратная зависимость между температурой глицерина и интенсивностью затухания его динамических колебаний: снижение вязкости жидкости при нагреве с 0 до 40 °С приводит к увеличению продолжительности динамических нагрузок;

2) выявлена нелинейная зависимость максимальной кинетической энергии от температуры, с максимальным значением 2,66 МДж при 20 °С, что доказывает невозможность линейного прогнозирования максимальных нагрузок и подтверждает необходимость CFD-моделирования;

3) для повышения безопасности транспортировки вязких наливных грузов предпочтительна их перевозка в охлажденном состоянии, так как повышенная вязкость выступает естественным демпфером, поглощающим динамику жидкости.

Таким образом, результаты исследования показывают, что температурный режим перевозки вязких жидких грузов оказывает решающее влияние на их динамическое поведение. Оптимальным условием транспортировки вязких жидкостей, таких как глицерин, является поддержание их в охлажденном состоянии, при котором повышенная вязкость эффективно демпфирует колебания и снижает риск возникновения гидроударов, обеспечивая тем самым устойчивость флекситанка при транспортировке.

Список литературы

1 **Gradinscak, M.** Liquid Sloshing in Containers with Flexibility : A thesis submitted in fulfillment of the requirements for the degree of Doctor of Philosophy / M. Gradinscak // School of Engineering and Science, Victoria University. – Melbourne, Australia, 2009. – 192 p.

2 **Wang, Z.** Study on Impact Process of a Large LNG Tank Container for Trains / Z. Wang, C. Qian, W. Li // Applied Sciences. – 2023. – Vol. 13, № 1351. – P. 1–19.

3 **Konar, T.** A review of numerical modelling of liquid sloshing in partially filled containers / T. Konar, A. Das // Ships and Offshore Structures, – 2024. – P. 1–26.

4 **Lide, D. R.** CRC handbook of chemistry and physics / D. R. Lide // Boca Raton: CRC press, 2004. – 2656 p.

УДК 548.24

РОЛЬ ЗЕРНА ПОЛИКРИСТАЛЛА У УСТЬЯ ОСТАТОЧНОГО КЛИНОВИДНОГО МИКРОДВОЙНИКА В ФОРМИРОВАНИИ ПОЛЕЙ МЕХАНИЧЕСКИХ НАПРЯЖЕНИЙ В КРУПНОМ СДВОЙНИКОВАННОМ ЗЕРНЕ

О. М. ОСТРИКОВ

Белорусский государственный университет транспорта, г. Гомель

В транспортных технических системах металлы используются преимущественно в поликристаллическом состоянии. Поэтому надежность и безопасность транспорта, устойчивость его к разрушению зависит от процессов, протекающих в зернах поликристаллов под действием механических нагрузок.

Одним из основных каналов пластической деформации твердых тел выступает деформационное двойникование, которое при определенных условиях способствует зарождению разрушения, причем при механических нагрузках, значительно более низких по величине, чем величина нагрузок, соответствующих пределу прочности материала.

В широко используемых на практике поликристаллических конструкционных материалах двойникование проявляется в зернах. Поэтому важной научно-практической проблемой является разработка методов расчета напряженно-деформированного состояния, формируемого в зернах поликристаллов под влиянием механического двойникования.

Целью данной статьи стала разработка методики расчета полей напряжений в крупном зерне поликристалла с остаточным клиновидным микродвойником и учет роли в формировании напряженного состояния соседнего зерна, находящегося у устья двойника.

На рисунке 1 представлены результаты расчетов, которые основаны на положениях теории дислокаций и принципа суперпозиции, правомерного в рамках теории упругости. Согласно рисунку 1 максимальные нормальные напряжения σ_{xx} , σ_{yy} , σ_{zz} наблюдаются на границе зерна, к которой приле-