

УДК 621.74: 62-4: 51-74

## ПРИМЕНЕНИЕ МУЛЬТИМАСШТАБНОГО ПОДХОДА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ СВОЙСТВ КОМПОЗИЦИОННОГО МАТЕРИАЛА ПРИ ИНЖЕКЦИОННОМ ЛИТЬЕ

<sup>1</sup>Степаненко И.С., <sup>1,2</sup>Хаймович И.Н.

<sup>1</sup>ФГАОУ ВО «Самарский национальный исследовательский университет  
имени академика С.П. Королева», Самара, e-mail: [iliya.stepanenko@gmail.com](mailto:iliya.stepanenko@gmail.com);  
<sup>2</sup>ЧОУ ВО «Международный институт рынка», Самара, e-mail: [kovalek68@mail.ru](mailto:kovalek68@mail.ru)

Рассмотрен метод подготовки модели структуры композиционного материала, армированного дискретной фазой, для проведения прочностного расчёта в САЕ-системе. Метод основан на алгоритме гомогенизации по среднему полю напряжений и деформаций и учитывает влияние распределения и направленности дисперсной фазы. Современные САЕ-системы моделирования процесса литья могут предложить параметры процесса лишь исходя из рекомендуемых параметров переработки материала. При этом выбор оптимальных параметров остаётся за технологом, и такая оптимизация параметров должна проводиться посредством соответствующих методов, в том числе встроенных в САЕ-систему (например, метод Тагути). Однако для верификации конкретной численной модели требуется проведение её калибровки для устранения ошибки при расхождении граничных условий моделирования и реальных параметров технологического процесса, т.к. модель всегда является упрощением. В частности, можно контролировать теоретический и экспериментальный профили течения и оценивать разницу между ними. Апробация метода была проведена при имитационном конечно-элементном моделировании инжекционного литья лопатки из полиэфирэфиркетона, армированного коротким углеволокном. Полученная картина распределения и ориентации армирующей фазы в рамках концепции мультимасштабного подхода является основой для расчета анизотропных свойств материала для ячейки представительного объёма материала, переноса этих свойств к сетке конечных элементов и экспорта данных в САЕ-систему прочностного анализа.

**Ключевые слова:** композиционный материал, имитационное моделирование, мультимасштабный подход, алгоритмы гомогенизации, статорная лопатка, полиэфирэфиркетон, анизотропия свойств

## USING OF MULTISCALE APPROACH FOR DEFINING MECHANICAL PROPERTIES OF INJECTION MOULDED COMPOSITE PART

<sup>1</sup>Stepanenko I.S., <sup>1,2</sup>Khaimovich I.N.

<sup>1</sup>Samara National Research University, Samara, e-mail: [iliya.stepanenko@gmail.com](mailto:iliya.stepanenko@gmail.com);  
<sup>2</sup>POU VO «International Market Institute», Samara, e-mail: [kovalek68@mail.ru](mailto:kovalek68@mail.ru)

Method for developing of structure model for fiber-reinforced composite material investigated to make possible carrying out structural analysis. The method is founded on a mean field homogenization framework and can take into account fiber distribution and orientation. Modern CAE-systems modeling casting process parameters can offer only on the basis of the recommended parameters of the processing of the material. The choice of optimal parameters remains for technology and optimization of such parameters should be carried out by appropriate methods, including built-in CAE-system (eg, Taguchi method). However, to verify a particular numerical model requires its calibration to eliminate errors in the divergence of the boundary conditions for the simulation and actual process parameters, because model is always a simplification. In particular, it is possible to control the profiles of the theoretical and experimental flow and estimate the difference between them. Approbation of the method was made with finite-element simulation of injection moulding of gas-turbine engines' stator blade made of carbon fiber-reinforced polyether ether ketone. Multiscale approach based on obtained fiber distribution and orientation provide input data for calculating materials' anisotropic behavior as a representative volume element. As a result these properties was mapped to finite-element mesh for exporting to structural analysis CAE software.

**Keywords:** composite materials, simulation modelling, multiscale approach, homogenisation algorithm, stator blade, polyether ether ketone, anisotropy

Для литья под давлением (инжекционного литья) полимерных композиционных материалов (ПКМ), армированных дискретным высокомодульным волокном, характерно то, что распределение волокна (его направленность и длина) в готовом изделии будет значительно варьироваться. Для моделирования данного процесса можно использовать математические и компьютерные модели [1–6]. Таким образом, заданные условия процесса литья влияют

на конечные механические свойства детали [8–11]. При этом композитный материал является анизотропным и гетерогенным, что сильно осложняет проведение достоверной симуляции классическим подходом, основанным на макроскопической модели. Прогнозирование свойств такого материала возможно посредством мультимасштабного подхода [7, 13].

Гетерогенное твёрдое тело состоит из фазы материала-матрицы и множества фаз-

включений (например, волокон, микрополостей, частиц или микротрещин). Можно выделить 2 уровня: микроскопический и макроскопический. Гетерогенность структуры проявляется на микроуровне, в то время как на макроуровне твёрдое тело можно рассматривать как локально гомогенное.

Классическая схема перехода от микро-масштабной к макромасштабной модели заключается в следующем.

1. Экспериментально де факто либо теоретически численными методами определяются ключевые параметры микроструктуры. Для коротковолокнистых ПКМ – это распределение и направленность армирующего волокна в полимерной матрице. Длина волокна известна априори.

2. На основе параметров микроструктуры (микромодель структуры материала) с применением методов гомогенизации механики сплошных сред рассчитывают анизотропные механические свойства материала в элементарном макрообъёме (макромодель структуры материала).

3. С использованием макромодели, когда в любой точке материала рассчитаны его анизотропные механические свойства, производят необходимый прочностный анализ в зависимости от граничных и начальных условий.

На практике численными методами невозможно получить механические свойства на уровне достаточно малого масштаба. Поэтому берут в рассмотрение макроуровень и считают, что каждая материальная точка является центром ячейки представительского объёма (ЯПО) с соответствующей гетерогенной микроструктурой. Классическая механика твёрдых тел применяется для макромасштаба, при этом в каждой расчётной точке значения напряжений и деформаций является граничным условием (ГУ) соответствующей ЯПО. Решением каждой ЯПО являются значения напряжений и жёсткости, которые действуют на макроуровне.

Для ЯПО с классическими граничными условиями макронапряжения и деформации равны среднеобъёмным ЯПО неизвестных полей микронапряжений и деформаций внутри ЯПО. Согласно теории линейной эластичности, соотношение двух средних значений даёт эффективные и общие жёсткости композита на макроуровне.

Для решения проблемы ЯПО, можно использовать конечно-элементный (КЭ) метод. Несмотря на то что метод является очень распространённым и точным, создание достаточно реалистичной сетки микроструктуры является сложной задачей. Кроме того, при нелинейной постановке задачи (например, неэластичное поведение мате-

риала) возникают большие процессорные времязатраты.

Совершенно другой подход предлагает метод гомогенизации по среднему полю (ГСП), который основан на предположении о взаимосвязях средних полей напряжений и деформаций в каждой фазе ЯПО (рис. 1). По сравнению с прямым КЭ-методом и другими существующими методами перехода между макро- и микроуровнями, ГСП является самым простым в использовании и наиболее быстрым. Тем не менее, его недостатком является невозможность предоставить детальную информацию о полях напряжений и деформаций в каждой фазе, и он применим только для эллипсоидной формы включений.

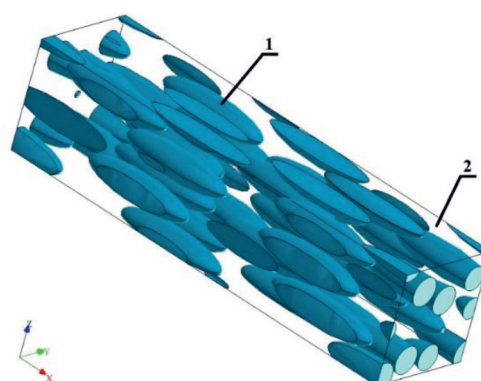


Рис. 1. Ячейка представительского объёма композиционного материала: фаза-включение (1), фаза материала-матрицы (2)

Тензор ориентации второго порядка ( $a_{ij}$ ) является эффективным способом описания ориентации волокна при инъекционном литье. Тензор состоит из девяти компонент с индексами, обозначающими направление потока, поперечное направление и направление вдоль толщины детали. Вследствие свойства симметричности  $a_{ij} = a_{ji}$  и условия нормализации ( $a_{11} + a_{22} + a_{33} = 1$ ) девять компонент сокращаются до 5 независимых переменных:

$$a_{ij} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{32} & a_{33} \end{bmatrix} \longrightarrow \begin{bmatrix} \lambda_1 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda_2 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda_3 \end{bmatrix}; [e_1 e_2 e_3].$$

Наибольший интерес представляют следующие три компонента:

- $a_{11}$  – ориентация волокна в направлении течения (значение изменяется от 0 до 1);
- $a_{22}$  – ориентация волокна в поперечном потоку направлении (0...1);
- $a_{13}$  – угол наклона в плоскости 1–3 (–0,5...0,5).

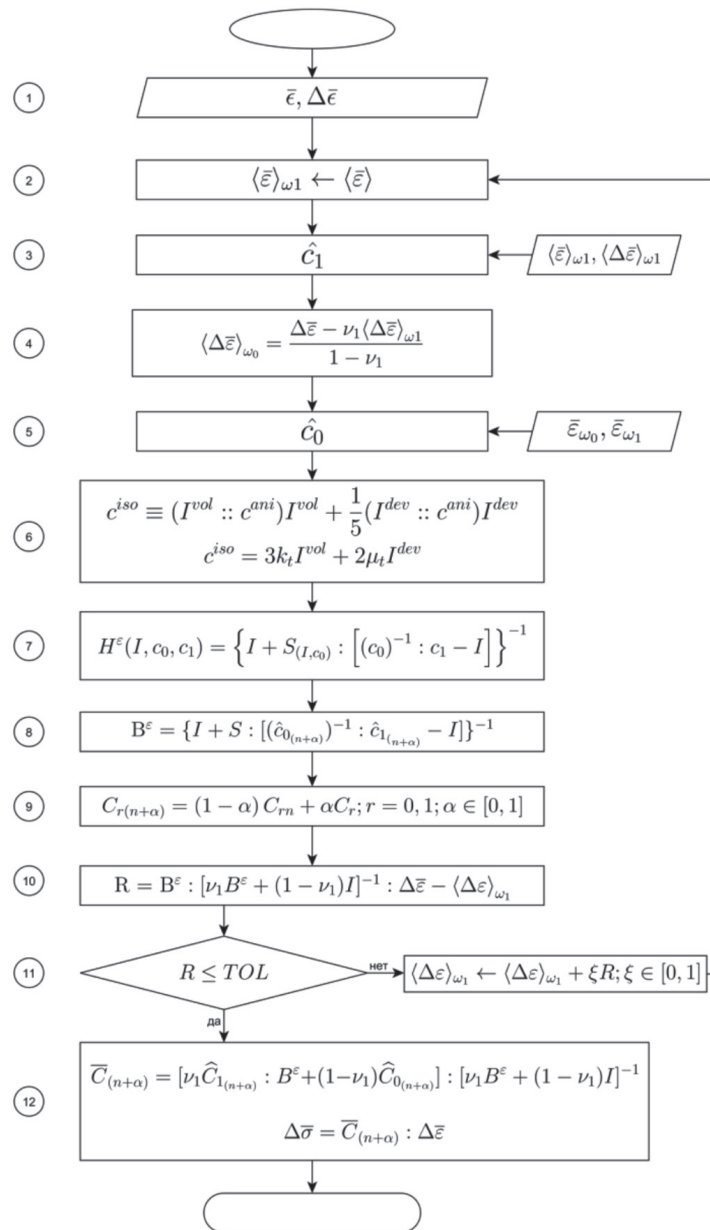


Рис. 2. Схема алгоритма метода среднего поля

Одним из получивших распространение в системах численного моделирования алгоритмов гомогенизации свойств материала является метод эффективного поля [1]. Схема алгоритма представлена на рис. 2.

1. На временном интервале  $[t_n, t_{n+1}]$  исходными данными являются общие деформации на макроуровне  $\bar{\epsilon}$  и приращения деформации  $\Delta\bar{\epsilon}$ , а также значения остальных параметров к моменту времени  $t_n$ .

2. Начало расчёта приращения усреднённой деформации в фазе включения.

3–5. Определение матрицы расчётных коэффициентов жёсткости материала включений  $\hat{C}_1$  и материала матрицы  $\hat{C}_0$ .

6. Расчёт усреднённой деформации в матрице.

7. Выделение изотропной части матрицы жёсткости  $c_0^{iso}$ .

8. Вычисление тензора Эшелби  $S(I, c_0^{iso})$  для единичного включения матрицы модулей жёсткости.

9. Вычисление значений дискретных расчётных модулей жёсткости  $C_0$  и  $C_1$  на временном шаге  $t_{n+\alpha}$ .

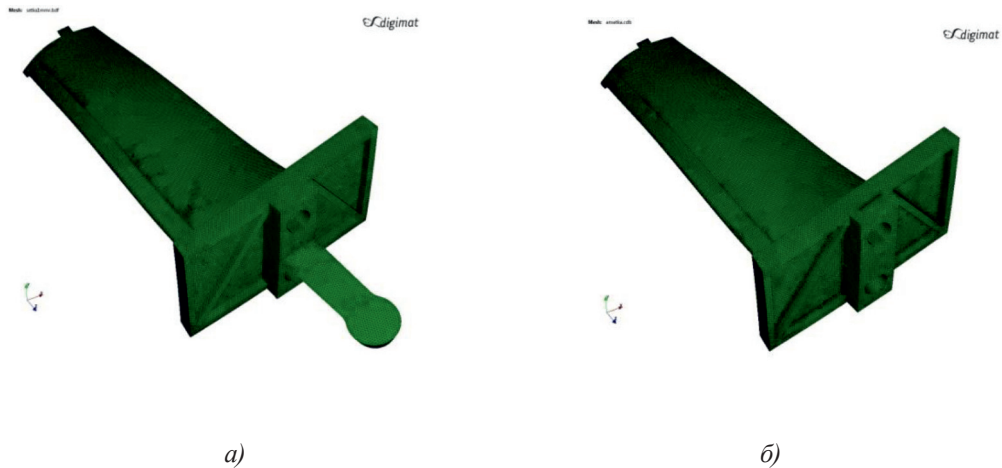


Рис. 3. Исходная сетка инжекционного литья (а) и структурная сетка прочностного расчёта (б)

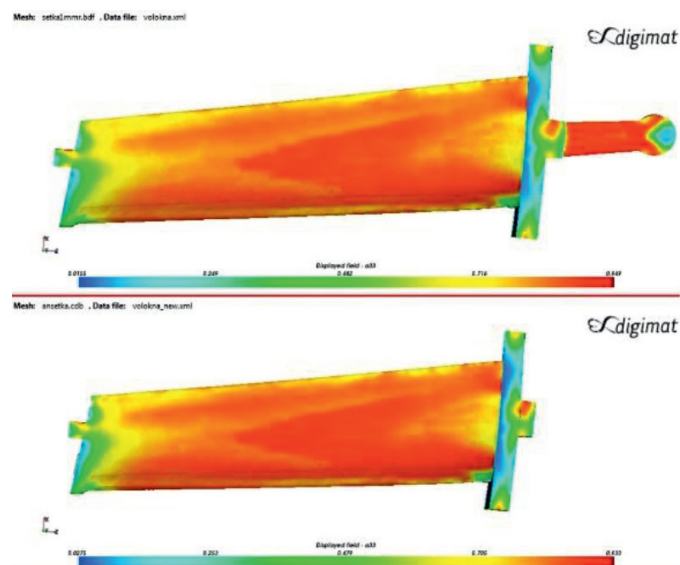


Рис. 4. Результат процедуры маппинга

10. Вычисление тензора концентраций деформаций.

11. Проверка сходимости расчётной и исходной (для шага  $t_{n+\alpha}$ ) усреднённой деформаций во включении. Если  $|R|$  в пределах допуска на усреднённую деформацию в фазе наполнителя, то выходим из цикла. Иначе осуществляется новая итерация (переход на первый шаг) с уменьшенным значением  $\Delta \bar{\epsilon}_{01}$ .

12. После завершения цикла вычисляются значения макроскопических матриц жёсткости  $\bar{C}_{n+\alpha}$  и тензора напряжений  $\Delta \bar{\sigma}$ .

Рассмотренный алгоритм был апробирован при численном моделировании

формирования структуры ПКМ и расчета прочности литой лопатки из ПКМ в связке САЕ-систем Moldex3D-Digimat-ANSYS.

Объект моделирования – статорная лопатка компрессора ГТД. Полимерный композиционный материал – полиэфирфиркетон, на 40% армированный углеволокном (РЕЕК90НMF40).

Современные САЕ-системы моделирования процесса литья могут предложить параметры процесса лишь исходя из рекомендуемых параметров переработки материала. При этом выбор оптимальных параметров остаётся за технологом, и такая оптимизация параметров должна



проводиться посредством соответствующих методов, в том числе встроенных в САЕ-систему (например, метод Тагути). Однако для верификации конкретной численной модели требуется проведение её калибровки для устранения ошибки при расхождении граничных условий моделирования и реальных параметров технологического процесса, т.к. модель всегда является упрощением. В частности, можно контролировать теоретический и экспериментальный профили течения и оценивать разницу между ними.

Как уже было отмечено выше, для определения прочностных характеристик неоднородного материала необходимо определение направления и распределения волокон [5, 6], являющихся исходными данными вышеизложенного алгоритма гомогенизации. Эти параметры описываются тензором ориентации второго порядка. Для их графического представления генерируется собственный вектор. Собственный вектор показывает главные направления ориентации волокна, и собственные значения дают статистическое распределение волокна в направлении главных осей (от 0 до 1). Исходя из этих данных, определяется направленность эллипсоида, которая полностью описывает распределение волокна по направлениям для каждого конечного элемента.

Объёмное распределение и направленность волокон в форме тензора ориентации есть результат моделирования инъекционного литья в САЕ-системе. При этом КЭ-сетка, используемая в расчёте в Moldex3D, не обязательно будет совпадать с сеткой ANSYS, поскольку алгоритмы прочностного анализа отличаются от алгоритмов моделирования течения расплава (рис. 3). Поэтому необходимо провести перенос тензоров ориентации между сетками (маппинг), что осуществляется с помощью DIGIMAT-MAP (рис. 4).

Рассмотренный алгоритм гомогенизации является эффективным средством для перехода от параметров микроструктуры к макросвойствам материала с целью учёта его локальной анизотропии при проектировании изделий и оптимизации технологических режимов инъекционного литья.

#### Список литературы

1. Гречников Ф.В., Хаймович И.Н. Разработка информационных систем управления конструкторско-технологической подготовкой производства как интегрированной базы информационных и функциональных структур // Кузнечно-штамповочное производство. Обработка материалов давлением. – 2008. – № 3. – С. 34–41.

2. Хаймович И.Н. Автоматизация проектирования объектов заготовительно-штамповочного производства ком-

прессорных лопаток авиационных двигателей // Известия вузов. Авиационная техника. – 2014 – № 2. – С. 44–48.

3. Хаймович И.Н. Методология организации согласованных механизмов управления процессом конструкторско-технологической подготовки производства на основе информационно-технологических моделей: Автореф. дис. док. техн. наук. – Самара, 2008. – 26 с.

4. Хаймович И.Н., Клентак Л.С. Усовершенствование методов сглаживания сложных поверхностей с использованием интерполяционных сплайнов // Фундаментальные исследования. – 2013. – № 10–12. – С. 2634–2638.

5. Хаймович И.Н., Хаймович А.И. Проектирование и реализация системы автоматизированного проектирования штамповки компрессорных лопаток из титановых сплавов // Известия высших учебных заведений. Цветная металлургия. – 2015. – № 2. – С. 37–43.

6. Хаймович И.Н., Хаймович А.И. Процедурные правила разработки и согласования бизнес-процессов кузнечно-штамповочного производства // Вестник Самарского государственного аэрокосмического университета им. академика С.П. Королева (национального исследовательского университета). – 2008. – № 1(14). – С. 248–252.

7. Doghri I., Ouaar A. Homogenization of two-phase elasto-plastic composite materials and structures: study of tangent operators, cyclic plasticity and numerical algorithms // International Journal of Solids and structures. – 2003. – Vol. 40. – № 7. – P. 1681–1712.

8. Fu S.Y., Lauke B. Effects of fiber length and fiber orientation distributions on the tensile strength of short-fiber-reinforced polymers // Composites Science and Technology. – 1996. – Vol. 56. – № 10. – P. 1179–1190.

9. Ogierman W., Kokot G. A study on fiber orientation influence on the mechanical response of a short fiber composite structure // Acta Mechanica. – 2016. – Vol. 227. – № 1. – P. 173–183.

10. Shokri P., Bhatnagar N. Effect of packing pressure on fiber orientation in injection molding of fiber-reinforced thermoplastics // Polymer Composites. – 2007. – Vol. 28. – № 2. – P. 214–223.

11. Sun X. et al. Measurement and quantitative analysis of fiber orientation distribution in long fiber reinforced part by injection molding // Polymer Testing. – 2015. – Vol. 42. – P. 168–174.

12. Swain S.S. et al. Investigation of fibre orientation using SEM micrograph and prediction of mechanical properties through micromechanical modelling // Bulletin of Materials Science. – 2016. – T. 39. – № 3. – P. 837–846.

13. Wu L. et al. A multiscale mean-field homogenization method for fiber-reinforced composites with gradient-enhanced damage models // Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering. – 2012. – Vol. 233. – P. 164–179.

#### References

1. Grechnikov F.V., Hajmovich I.N. Razrabotka informacionnyh sistem upravlenija konstruktorsko-tehnologicheskoy podgotovkoj proizvodstva kak integrirovannoj bazy informacionnyh i funkcionalnyh struktur // Kuznechno-shtampovочное производство. Obrabotka materialov davleniem. 2008. no. 3. pp. 34–41.

2. Hajmovich I.N. Avtomatizacija proektirovaniya obektov zagotovitelno-shtampovочного proizvodstva kompressornyh lopatok aviacionnyh dvigatelej // Izvestija vuzov. Aviacionnaja tehnika. 2014 no. 2. pp. 44–48.

3. Hajmovich I.N. Metodologija organizacii soglasovannyh mehanizmov upravlenija processom konstruktorsko-tehnologicheskoy podgotovki proizvodstva na osnove informacionno-tehnologicheskikh modelej: Avtoref. dis. dok. tehn. nauk. Samara, 2008. 26 p.

4. Hajmovich I.N., Klentak L.S. Usovershenstvovanie metodov sglazhivaniya slozhnyh poverhnostej s ispolzovaniem interpoljacionnyh splajnov // Fundamentalnye issledovanija. 2013. no. 10–12. pp. 2634–2638.

5. Hajmovich I.N., Hajmovich A.I. Proektirovanie i realizacija sistemy avtomatizirovannogo proektirovanija shtampovki kompressornyh lopatok iz titanovyh splavov // *Izvestija vysshih uchebnyh zavedenij. Cvetnaja metallurgija*. 2015. no. 2. pp. 37–43.
6. Hajmovich I.N., Hajmovich A.I. Procedurnye pravila razrabotki i soglasovanija biznes-processov kuznechno-shtampovochnogo proizvodstva // *Vestnik Samarskogo gosudarstvennogo ajerokosmicheskogo universiteta im. akademika S.P. Koroleva (nacionalnogo issledovatel'skogo universiteta)*. 2008. no. 1(14). pp. 248–252.
7. Doghri I., Ouaar A. Homogenization of two-phase elastoplastic composite materials and structures: study of tangent operators, cyclic plasticity and numerical algorithms // *International Journal of Solids and structures*. 2003. Vol. 40. no. 7. pp. 1681–1712.
8. Fu S.Y., Lauke B. Effects of fiber length and fiber orientation distributions on the tensile strength of short-fiber-reinforced polymers // *Composites Science and Technology*. 1996. Vol. 56. no. 10. pp. 1179–1190.
9. Ogierman W., Kokot G. A study on fiber orientation influence on the mechanical response of a short fiber composite structure // *Acta Mechanica*. 2016. Vol. 227. no. 1. pp. 173–183.
10. Shokri P., Bhatnagar N. Effect of packing pressure on fiber orientation in injection molding of fiber-reinforced thermoplastics // *Polymer Composites*. 2007. Vol. 28. no. 2. pp. 214–223.
11. Sun X. et al. Measurement and quantitative analysis of fiber orientation distribution in long fiber reinforced part by injection molding // *Polymer Testing*. 2015. Vol. 42. pp. 168–174.
12. Swain S.S. et al. Investigation of fibre orientation using SEM micrograph and prediction of mechanical properties through micromechanical modelling // *Bulletin of Materials Science*. 2016. T. 39. no. 3. pp. 837–846.
13. Wu L. et al. A multiscale mean-field homogenization method for fiber-reinforced composites with gradient-enhanced damage models // *Computer Methods in Applied Mechanics and Engineering*. 2012. Vol. 233. pp. 164–179.