

DOI 10.32820/2079-1747-2019-24-24-32

УДК 621.914

СРАВНИТЕЛЬНЫЙ АНАЛИЗ ТЕМПЕРАТУРЫ РЕЗАНИЯ ПРИ ШЛИФОВАНИИ И ТОЧЕНИИ И УСЛОВИЯ ЕЕ УМЕНЬШЕНИЯ

©Полянский В. И.

НПО «Империя металлов», г. Харьков

Информация об авторе:

Полянский Владимир Иванович – ORCID: 0000-0001-54482-9955; fokusnic1@gmail.com; кандидат технических наук, Генеральный директор, НПО «Империя металлов», Григоровское шоссе, 88, г. Харьков, 61020, Украина

Приведены аналитические зависимости для определения температуры резания при шлифовании и точении на основе представления снимаемого припуска в виде пакета элементарных прямолинейных адиабатических стержней, которые перерезаются режущим инструментом в процессе обработки. Такой подход к расчету температуры резания позволяет с единых позиций оценить технологические возможности процессов шлифования и точения и научно обоснованно подойти к выбору наиболее эффективного метода финишной механической обработки деталей машин. Показано, что при шлифовании расхождение расчетных и экспериментальных значений температуры резания небольшое – в пределах 10 %. При точении это расхождение увеличивается до 2 раз и более, что снижает точность расчетов. Установлено, что причиной такого большого расхождения является периодический (дискретный) характер перерезания режущим инструментом элементарных прямолинейных адиабатических стержней. Исходя из этого, для более точного расчета температуры резания при точении учтено количество перерезаний адиабатического стержня, т.е. количество элементарных объемов обрабатываемого материала, образующихся за время прохождения резцом зоны резания. Подвод тепла к элементарному прямолинейному адиабатическому стержню рассматривался дискретно изменяющимся во времени. В результате выполненных расчетов установлено, что в этом случае температура резания при точении уменьшается приблизительно в 2 раза, а это приводит в соответствие теорию и практику механической обработки. Также установлено, что чем меньше количество элементарных объемов обрабатываемого материала, образующихся за время прохождения резцом зоны резания, тем меньше температура резания. Например, при осуществлении точения с минимально возможным количеством элементарных объемов обрабатываемого материала, образующихся за время прохождения резцом зоны резания, равным 2, температура резания может быть уменьшена до 10 раз.

Ключевые слова: механическая обработка; резец; шлифовальный круг; условное напряжение резания; качество обработки; производительность обработки.

Полянський В. І. «Порівняльний аналіз температури різання при шліфуванні та точінні й умови її зменшення»

Наведено аналітичні залежності для визначення температури різання при шліфуванні та точінні на основі подання припуску, що знімається, у вигляді пакету елементарних прямолінійних адіабатичних стрижнів, які перерізаються різальним інструментом в процесі обробки. Такий підхід до розрахунку температури різання дозволяє з єдиних позицій оцінити технологічні можливості процесів шліфування та точіння й науково обґрунтовано підійти до вибору найбільш ефективного методу фінішної механічної обробки деталей машин. Показано, що при шліфуванні розбіжність розрахункових і експериментальних значень температури різання незначна – в межах 10 %. При точінні ця розбіжність збільшується до 2 разів і більше, що знижує точність розрахунків. Встановлено, що причиною такої великої розбіжності є періодичний (дискретний) характер перерізання різальним інструментом елементарних прямолінійних адіабатичних стрижнів. Виходячи з цього, для більш точного розрахунку температури різання при точінні враховано кількість перерізаних адіабатичного стрижня, тобто кількість елементарних об'ємів оброблюваного матеріалу, що утворюються за час проходження різцем зони різання. Підведення тепла до елементарного прямолінійного адіабатичного стрижня розглядалося дискретно змінюваним в часі. В результаті виконаних розрахунків встановлено, що в цьому випадку температура різання при точінні зменшується приблизно в 2 рази, а це приводить у відповідність теорію та практику механічної обробки. Також встановлено, що чим менше кількість елементарних об'ємів оброблюваного матеріалу, що утворюються за час проходження різцем зони різання, тим менше температура різання. Наприклад, при здійсненні точіння з мінімально можливою кількістю елементарних об'ємів оброблюваного матеріалу, що утворюються за час проходження різцем зони різання, рівною 2, температура різання може бути зменшена до 10 разів.

Ключові слова: механічна обробка, різець, шліфувальний круг, умовне напруження різання, якість обробки, продуктивність обробки.

Polyansky V. «A comparative analysis of the cutting temperature during grinding and turning and the conditions for its reduction»

Analytical dependences are given for determining the cutting temperature during grinding and turning based on the representation of the removed allowance in the form of a package of elementary straight-line adiabatic rods that are cut by a cutting tool during processing. Such an approach to calculating the cutting temperature makes it possible to evaluate technological capabilities of grinding and turning processes from a single point of view and scientifically substantiate the choice of the most effective method of finishing machining of machine parts. It is shown that during grinding the discrepancy between the calculated and experimental values of the cutting temperature is small - within 10%. When turning, this discrepancy increases to 2 times or more, which reduces the accuracy of the calculations. It is established that the reason for such a large discrepancy is the periodic (discrete) nature of the cutting by the cutting tool of elementary

rectilinear adiabatic rods. Based on this, for a more accurate calculation of the cutting temperature during turning, the number of cuts of the adiabatic core, i.e. the number of elementary volumes of the processed material generated during the passage of the cutter cutting zone. The heat supply to the elementary rectilinear adiabatic rod was considered discretely varying in time. As a result of the calculations, it was found that in this case, the cutting temperature during turning decreases by about 2 times, and this brings the theory and practice of machining in line. It was also established that the smaller the number of elementary volumes of the processed material generated during the passage of the cutting zone by the cutter, the lower the cutting temperature. For example, when turning with the smallest possible number of elementary volumes of the processed material generated during the passage of the cutting zone by the cutter equal to 2, the cutting temperature can be reduced to 10 times.

Keywords: mechanical processing; cutter; grinding wheel; conditional cutting voltage; processing quality; processing performance

Введение

Повышение качества и производительности механической обработки являются важнейшими задачами создания конкурентоспособной машиностроительной продукции. Поэтому применение в производстве современных металлорежущих станков с ЧПУ типа «обрабатывающий центр» и прогрессивных сборных режущих лезвийных твердосплавных и керамических инструментов с износостойкими покрытиями зарубежного производства открывает широкие перспективы решения поставленных задач. Однако выбор наиболее эффективных методов механической обработки конкретных деталей в основном производится интуитивно на основе практического опыта технолога, что не всегда оказывается оправданным. Это связано с отсутствием в настоящее время теоретических технологических решений, необходимых для правильного выбора рациональных методов механической обработки. В особой мере это относится к теплофизическим решениям, которые не позволяют в полном объеме провести сравнение температуры резания для таких методов окончательной обработки как шлифование и точение и выбрать наиболее эффективный метод. Поэтому в работе решается актуальная задача дальнейшего развития математических моделей тепловых процессов при механической обработке для научно обоснованного определения условий уменьшения температуры резания и повышения эффективности обработки.

1. Анализ последних исследований и публикаций

Математическому моделированию температуры резания при механической обработке посвящены работы [1–3]. Однако в них для решения сложного дифференциального уравнения теплопроводности принято нулевое значение температуры резания на бесконечном удалении от действия теплового источника. Это ограничивает возможность определения глубины проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали, которая должна

принимать не бесконечное, а конечное значение. Поэтому важно определить температуру резания при шлифовании и точении с учетом конечного значения глубины проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали и на этой основе уточнить известные теплофизические решения. Это позволит научно-обоснованно подойти к установлению условий уменьшения температуры резания при шлифовании и точении.

2. Постановка проблемы

В работе [4] предложена расчетная схема температуры резания при шлифовании (рис. 1), позволяющая глубину проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали рассматривать конечной величиной.

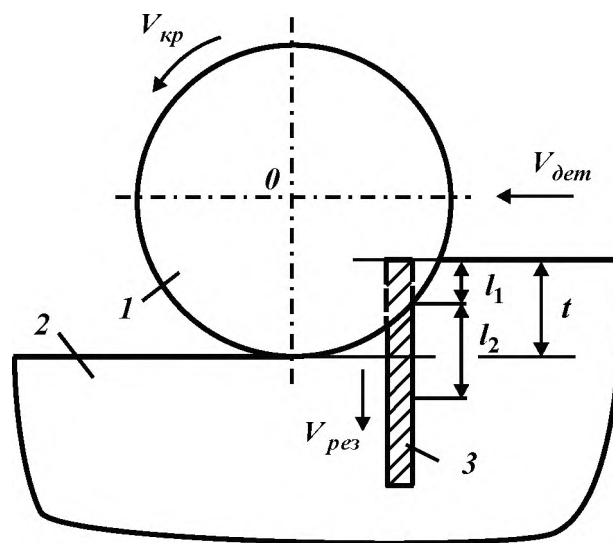


Рис. 1 – Расчетная схема определения температуры резания при плоском шлифовании: 1 – шлифовальный круг; 2 – обрабатываемый материал; 3 – адиабатический стержень (l_1 – длина срезанной части адиабатического стержня; l_2 – глубина проникновения тепла в поверхностный слой обрабатываемой детали; $V_{кр}$ – скорость круга)

Для этого снимаемый припуск представлен пакетом элементарных прямолинейных адиабатических стержней, которые при шлифовании перерезаются шлифовальным кругом и по которым образующееся при резании тепло уходит в поверхностный слой обрабатываемого материала вследствие его теплопроводности. В пределах глубины шлифования тепловой поток перемещается вдоль адиабатического стержня с постоянной скоростью $V_{рез}$, равной скорости перерезания адиабатического стержня шлифовальным кругом, движущимся равномерно со скоростью $V_{дет}$ вдоль обрабатываемой детали. Исходя из такого представления процесса резания, необходимо определить температуру резания при шлифовании и точении и научно обоснованно подойти к выбору наиболее эффективного метода финишной механической обработки деталей машин.

4. Целью исследования является теоретическое обоснование условий уменьшения температуры резания при шлифовании и точении и разработка практические рекомендации по повышению эффективности механической обработки.

5. Изложение основного материала

Исходя из расчетной схемы, приведенной на рис. 1, установлена аналитическая зависимость для определения температуры резания θ при шлифовании [5, 6]:

$$\left(1 - \frac{\theta}{\theta_{max}}\right) \cdot e^{\frac{\theta}{\theta_{max}}} = e^{-\frac{c \cdot \rho \cdot V_{рез}^2 \cdot \tau}{\lambda}}, \quad (1)$$

где $\theta_{max} = \sigma / (c \cdot \rho)$ – максимальная температура резания, град; σ – условное напряжение резания, Н/м²; c – удельная теплоемкость обрабатываемого материала, Дж/(кг·град); ρ – плотность обрабатываемого материала, кг/м³; λ – коэффициент теплопроводности обрабатываемого материала, Вт/(м·град); τ – время перерезания элементарного прямолинейного адиабатического стержня, с.

При шлифовании $\tau = t / V_{рез}$; $V_{рез} = V_{оет} \cdot \sqrt{0,5 \cdot t / R_{кр}}$, где t – глубина шлифования, м; $R_{кр}$ – радиус шлифовального круга, м. Зависимость (1) применима и при точении, рассматривая $\tau = a / V_{рез}$; $V_{рез} = V \cdot tg\beta$, где a – толщина среза, м; V – скорость резания, м/с; β – условный угол сдвига обрабатываемого материала. В итоге показатель степени числа $e \approx 2,72$ в правой части зависимости (1) равен: при шлифовании – $(c \cdot \rho / \lambda) \cdot V_{оет} \cdot t \cdot \sqrt{0,5 \cdot t / R_{кр}}$; при точении – $(c \cdot \rho / \lambda) \cdot a \cdot V \cdot tg\beta$.

Выполненные расчеты температуры резания θ при шлифовании на основе зависимости (1) показали на достаточно высокую степень ее сходимости с экспериментальными данными (расхождение в пределах 10 %). При точении стальных заготовок имеет место расхождение расчетных и экспериментальных значений температуры резания θ до 2 раз и более, что снижает точность расчетов. Причиной этому является периодический (дискретный) характер перерезания режущим инструментом элементарных прямолинейных адиабатических стержней (рис. 1), который не учитывается в расчетах.

Процесс шлифования осуществляется с относительно небольшой скоростью детали $V_{оет}$ и соответственно небольшой скоростью перерезания элементарного прямолинейного адиабатического стержня шлифовальным кругом $V_{рез}$ (рис. 1). Поэтому формирование температуры резания θ происходит фактически в условиях непрерывного характера перерезания шлифовальным кругом элементарных прямолинейных адиабатических стержней. Следовательно, расчет температуры резания θ при шлифовании на основе зависимости (1) можно

производить без учета периодического (дискретного) характера перерезания шлифовальным кругом элементарных прямолинейных адиабатических стержней.

При точении, во-первых, скорость резания V значительно больше скорости детали $V_{дет}$ при шлифовании. Во-вторых, больше толщина среза и толщина элементарного объема материала, отделяемого от основной массы материала в результате его сдвиговой деформации. В результате значительная часть выделяющегося при резании тепла постоянно уносится образующейся стружкой. Это принципиально изменяет закономерности формирования температуры резания θ при точении и, естественно, приводит к ее уменьшению. Поэтому расчет температуры резания θ при точении на основе зависимости (1) должен отличаться от аналогичного расчета, выполняемого при шлифовании. Для этого необходимо полученные расчетные значения температуры резания θ уменьшать в зависимости от количества перерезаний адиабатического стержня n , т.е. в зависимости от количества элементарных объемов обрабатываемого материала, образующихся за время прохождения резцом зоны резания. В табл. 1 приведены рассчитанные на основе зависимости (1) значения отношения θ / θ_{max} , принимая для обрабатываемого материала – стали 45 коэффициент температуропроводности $\lambda / (c \cdot \rho) = 8 \cdot 10^{-6} \text{ м}^2/\text{с}$; $\tau = 0,824 \cdot 10^{-4} \text{ с}$; $V_{рез} = 0,607 \text{ м/с}$.

Таблица 1– Расчетные значения отношения θ / θ_{max}

n	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
θ / θ_{max}	0,1	0,3658	0,522	0,6158	0,6729	0,7191	0,7558	0,7823	0,8042	0,8205

Как видно, чем больше величина n , тем больше отношение θ / θ_{max} . Очевидно, при точении величина n значительно меньше, чем при шлифовании. Следовательно, при точении уменьшается отношение θ / θ_{max} и температура резания θ , что приводит в соответствие расчетные и экспериментальные значения температуры резания θ . С учетом этого решения, полученные на основе зависимости (1), необходимо корректировать, умножая расчетное значение θ на отношение θ / θ_{max} , приведенное в табл. 1, для заданной величины n .

При шлифовании величина n принимает достаточно большие значения и, исходя из табл. 1, отношение $\theta / \theta_{max} \rightarrow 1$. Поэтому зависимость (1) не требует корректировки. Этим и объясняется тот факт, что расчеты температуры резания θ при шлифовании по зависимости (1) приводят к удовлетворительным результатам, а при точении имеет место расхождение расчетных и экспериментальных значений температуры резания θ .

Исходя из этого, возникает необходимость теоретического определения величины n при точении. Тангенциальную составляющую силы резания можно выразить зависимостью [7]:

$$P_z = \sigma \cdot F, \quad (2)$$

где $F = z \cdot a_1 \cdot \epsilon$ – площадь контакта обрабатываемого материала с передней поверхностью резца, м²; z – количество контактируемых элементарных объемов обрабатываемого материала с передней поверхностью резца (в данном случае для нулевого переднего угла резца); a_1 – длина контакта элементарного объема обрабатываемого материала с передней поверхностью резца, м; ϵ – ширина среза, м.

Сила, возникающая в условной плоскости сдвига обрабатываемого материала, равна

$$P = \tau_{сдв} \cdot L \cdot \epsilon, \quad (3)$$

где $\tau_{сдв}$ – предел прочности на сдвиг обрабатываемого материала, Н/м²; L – длина условной плоскости сдвига обрабатываемого материала, м.

Из условия $P = P_z \cdot \cos \beta$ с учетом известных соотношений $\sigma / \sigma_{сж} = \operatorname{tg} \beta$ [4]; $\sigma_{сж} / \tau_{сдв} \approx 2$ и зависимостей (2) и (3), имеем:

$$a_1 = \frac{a}{2 \cdot z \cdot \cos \beta}, \quad (4)$$

где $\sigma_{сж}$ – предел прочности на сжатие обрабатываемого материала, Н/м².

Тогда $n = a / a_1 = 2 \cdot z \cdot \cos \beta$. Как правило, основная силовая напряженность процесса резания достигается в момент съема двух нижерасположенных элементарных объемов обрабатываемого материала [8]. Это связано, во-первых, с необходимостью достижения силы P в момент отделения элементарного объема от обрабатываемого материала. Во-вторых, в обеспечении с силой P его дальнейшего продвижения (за счет пластического течения) вдоль условной плоскости сдвига обрабатываемого материала до момента отделения нового элементарного объема от обрабатываемого материала. Несомненно, и в дальнейшем будет затрачена определенная энергия на преодоление его трения с передней поверхностью резца. Однако она будет значительно меньше энергий, затрачиваемых на отделение элементарного объема от обрабатываемого материала и обеспечение его пластического течения вдоль условной плоскости сдвига обрабатываемого материала. Поэтому в зависимости (1) этот фактор можно не рассматривать.

С учетом сказанного, в этом случае за основу можно принять значение $z = 2$. Тогда, исходя из зависимости $n = a / a_1 = 2 \cdot z \cdot \cos \beta$, величина $n \rightarrow 4$ и отношение $\theta / \theta_{\max} \approx 0,5$ (табл. 1). Поэтому в зависимости (1) следует учитывать уменьшение температуры резания θ приблизительно в 2 раза, что приводит в соответствие расчетные и экспериментальные данные, полученные при точении стальных заготовок. Очевидно, при обработке хрупких материалов (чугунов) значения n и θ / θ_{\max} (табл. 1) будут еще меньше, что позволит более значительно уменьшить температуру резания θ .

Таким образом, в работе обоснованы отличительные особенности формирования температуры резания при точении по отношению к шлифованию. Полученные результаты позволяют уточнить расчеты температуры резания при точении. Из приведенного решения следует важный практический вывод, состоящий в том, что для снижения температуры резания θ при точении следует уменьшать величины z и n , например, величину n до минимально возможного значения $n = 2$. Тогда, согласно табл. 1, отношение θ / θ_{\max} и соответственно температура резания θ могут быть уменьшены до 10 раз. Это достигается, главным образом, за счет увеличения условного угла сдвига обрабатываемого материала β путем снижения интенсивности трения в зоне резания [9] и повышения режущей способности инструмента.

Выводы

Приведены аналитические зависимости для определения температуры резания при шлифовании и точении на основе представления снимаемого припуска в виде пакета элементарных прямолинейных адиабатических стержней, которые перерезаются режущим инструментом в процессе обработки. Показано, что при точении стальных заготовок для более точного расчета температуры резания необходимо учитывать количество перерезаний адиабатического стержня, т.е. количество элементарных объемов обрабатываемого материала, образующихся за время прохождения резцом зоны резания. Расчетами установлено, что в этом случае температура резания при точении уменьшается приблизительно в 2 раза, а это приводит в соответствие теорию и практику механической обработки. Также установлено, что чем меньше количество элементарных объемов обрабатываемого материала, образующихся за время прохождения резцом зоны резания, тем меньше температура резания, которая за счет этого может быть уменьшена до 10 раз.

Список використаних джерел

1. Сизый Ю. А. Динамика и теплофизика шлифования / Ю. А. Сизый, Д. В. Сталинский. – Харьков : ГП УкрНТЦ «Энергосталь», 2016. – 448 с.
2. Лищенко Н. В. Модель температурного цикла шлифования для технологической диагностики процесса / Н. В. Лищенко, В. П. Ларшин // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – 2011. – Вип. 118. – С. 185-193.
3. Якимов А. А. Исследование температуры поверхности при зубошлифовании на станке 5851 (MAAG) / А. А. Якимов // Вісник Харківського національного технічного університету сільського господарства імені Петра Василенка. – 2010. – Вип. 101. – С. 281-285.
4. Новиков Ф. В. Основы математического моделирования технологических процессов механической обработки : монография / Ф. В. Новиков. – Днепр : ЛИРА, 2018. – 400 с.
5. Полянский В. И. Математическая модель теплового процесса при шлифовании материалов / В. И. Полянский // Високі технології в машинобудуванні : зб. наук. праць. – Харків : НТУ «ХП», 2018. – Вип. 1 (28). – С. 120-130.
6. Полянский В. И. Расчет температуры шлифования с учетом баланса тепла, уходящего в стружки и обрабатываемую деталь / В. И. Полянский // Сучасні технології в машинобудуванні : зб. наук. праць. – Харків : НТУ «ХП», 2018. – Вип. 13. – С. 51-59.
7. Новиков Ф. В. Упрощенный расчет температуры резания при шлифовании и лезвийной обработке / Ф. В. Новиков, В. И. Полянский // Вісник НТУ «ХП». Серія: Технології в машинобудуванні. – Харків : НТУ «ХП», 2017. – № 17 (1239). – С. 87-92.
8. Обработка резанием деталей с покрытиями / С. А. Клименко, В. В. Коломиец, М. Л. Хейфец [и др.] ; под общей редакцией С. А. Клименко. – Киев : ИСМ им. В. Н. Бакуля НАН Украины, 2011. – 353 с.
9. Надтверді матеріали в механообробці : енциклопедичний довідник / В. І. Лавріненко, М. В. Новіков ; за заг. ред. М. В. Новікова. – Київ : ІНМ ім. В. М. Бакуля НАН України, 2013. – 456 с.

References

1. Sizyj, JuA & Stalinskij, DV 2016, *Dinamika i teplofizika shlifovanija*, Gosudarstvennoe predprijatje ukrainiskij nauchno-tehnicheskij centr metallurgicheskij promyshlennosti Jenergostal, Harkov.
2. Lishhenko, NV & Larshin, VP 2011, 'Model temperaturnogo cikla shlifovanija dlja tehnologicheskij diagnostiki processa', *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva imeni Petra Vasylenka*, iss. 118, pp. 185-193.
3. Jakimov, AA 2010, 'Issledovanie temperatury poverhnosti pri zuboshlifovanii na stanke 5851 (MAAG)', *Visnyk Kharkivskoho natsionalnoho tekhnichnoho universytetu silskoho hospodarstva imeni Petra Vasylenka*, iss. 101, pp. 281-285.
4. Novikov, FV 2018, *Osnovy matematicheskogo modelirovanija tehnologicheskijh processov mehanicheskij obrabotki*, LIRA, Dnepr.
5. Poljanskij, VI 2018, 'Matematicheskaja model teplovogo processa pri shlifovanii materialov', *Vysoki tekhnolohii v mashynobuduvanni*, Natsionalnyi tekhnichniy universytet Kharkivskiy politekhnichniy instytu, Kharkiv, iss. 1 (28), pp. 120-130.
6. Poljanskij, VI 2018, 'Raschet temperatury shlifovanija s uchetom balansa tepla, uhodjashhego v struzhki i obrabatyvaemuju detal', *Suchasni tekhnolohii v mashynobuduvanni*, Natsionalnyi tekhnichniy universytet Kharkivskiy politekhnichniy instytu, Kharkiv, iss. 13, pp. 51-59.
7. Novikov, FV & Poljanskij, VI 2017, *Uproshhennyj raschet temperatury rezanija pri shlifovanii i lezviyjnoj obrabotke*, *Visnyk Natsionalnoho tekhnichnoho universytetu Kharkivskiy politekhnichniy instytu*, Serii Tekhnolohii v mashynobuduvanni, Natsionalnyi tekhnichniy universytet Kharkivskiy politekhnichniy instytu, Kharkiv, no. 17 (1239), pp. 87-92.
8. Klimenko, SA, Kolomic, VV, Hejfec, ML, Pylypenko, AM, Melnyichuk, YuA & Burykyn, VV 2011, *Obrabotka rezaniem detalej s pokrytijami*, Institut sverhtvjordyh materialov imeni V. N. Bakulja Nacionalnoj akademii nauk Ukrainy, Kiev.
9. Lavrinenko, VI & Novikov, MV 2013, *Nadtverdi materialy v mekhanoobrobsi*, Institut nadtverdykh materialiv imeni V. M. Bakulia Natsionalnoi akademii nauk Ukrainy, Kyiv.

Стаття надійшла до редакції 12 жовтня 2019 р.