

УДК 621.762

DOI: 10.37142/2076-2151/2019-2(49)143

Кузьмов А. В.
Штерн М. Б.

УМЕНЬШЕНИЕ ДАВЛЕНИЯ ПУТЕМ ВРАЩЕНИЯ ПРЕСС-ИНСТРУМЕНТА ПРИ РАДИАЛЬНОМ ПРЕССОВАНИИ ТРУБЧАТЫХ ЗАГОТОВОК ИЗ ПОРОШКОВ МЕТАЛЛОВ

Методы обработки давлением материалов на основе порошков черных и цветных металлов являются одной из составляющих технологий современного машиностроения. Низкая металлоемкость, высокая размерная точность, а главное, возможность совмещения высоких механических свойств с функциональными характеристиками порошкового изделия определяет высокую конкурентоспособность данных методов и их распространение в мировой практике машиностроения. Традиционно наибольшее распространение получили схемы прессования в замкнутых неподвижных пресс-формах, то есть схемы одноосного деформирования. С другой стороны, известно, что наличие сдвиговых компонент деформации в определенной степени уменьшает рабочее давление прессования [1, 2].

В то же время применение схем деформирования, обеспечивающих наличие сдвиговых деформаций, находит в настоящее время широкое применение при обработке давлением компактных материалов. При этом, наряду с традиционными технологиями штамповки, существуют методы обработки, основной целью которых является накопление деформаций в заготовках, а не изменение их формы. К таким методам относятся винтовая экструзия [3], равноканальная угловая экструзия [4, 5], кручение под давлением [4, 6] и другие. В результате использования таких технологических процессов можно получить ультрамелкозернистую структуру обрабатываемого материала, который приобретает при этом качественно новые свойства.

В последнее время ведутся активные исследования по использованию этих технологий для обработки порошковых заготовок [7, 8, 9]. Наличие сдвиговых деформаций приводит к благоприятной ориентации металлических зерен, неметаллических включений и пор, появлению текстуры. Важной задачей при этом является возможность снизить энергосиловые параметры процесса и, в результате, повысить устойчивость деформирующего инструмента.

Следует отметить, что теория пластичности сжимаемых материалов прогнозирует уменьшение давления прессования при мгновенном появлении сдвиговых деформаций [1]. Однако в ходе длительного технологического процесса наличие дополнительных сдвиговых деформаций вызывает увеличение накопленной деформации и деформационного упрочнения, что приводит к противоположному эффекту увеличения давления прессования. Поэтому вопрос о целесообразности применения нестандартных схем прессования порошков со сдвиговыми деформациями, кроме анализа целесообразности усложнения технологического оборудования, требует также исследования влияния деформационного упрочнения. Такое исследование проводилось одним из авторов в работе [2] в которой схема с вращением пуансона при прессовании в закрытой пресс-форме исследовалась путем вычислительного моделирования методом конечных элементов. В этой работе было рассмотрено несколько конкретных случаев кинематической схемы и реологических параметров материала. Однако рекомендаций как в общем случае оценивать подобные схемы прессования дано не было. Поэтому возникает вопрос, нельзя ли исследовать влияние сдвиговых деформаций на давление прессования с учетом деформационного упрочнения материала в аналитическом виде для однородных напряженно-деформированных состояний, подобно тому, как это сделано для стандартных схем прессования в [10]. Это позволило бы, по крайней мере, на качественном уровне, оценивать подобные схемы прессования со сдвиговыми деформациями.

Схема прессования и реологическая модель материала.

Оказывается такой простой для анализа схемой может стать радиальное или осевое прессования трубчатых заготовок совмещенное с вращением внутренней и внешней стенок пресс-формы с разной угловой скоростью ω_1 и ω_2 . В данной работе рассматривается случай радиального прессования (рис. 1). При этом предполагается полное прилипание материала прессовки к внутренней и внешней стенкам. Ненулевыми компонентами тензора скоростей деформаций являются только e_{rr} и $e_{r\phi}$. При этом $e_{r\phi} = \frac{\omega_1 - \omega_2}{2 \ln(r_1 / r_2)}$, где r_1 и r_2 – соответственно внешний и внутренний радиусы трубчатой заготовки.

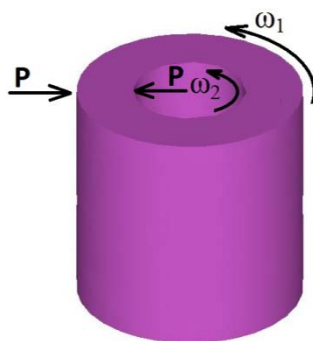


Рис. 1. Радиальное прессование трубчатых заготовок, совмещенное с вращением боковых стенок с разной угловой скоростью

В качестве определяющих соотношений берется пластическая модель на основе ассоциированного закона пластического течения $e_{ij} = \lambda \frac{\partial F}{\partial \sigma_{ij}}$; $\lambda > 0$ и поверхности нагружения F в виде:

$$F(\sigma_{ij}) = \frac{p^2}{\psi} + \frac{\tau^2}{\phi} - (1-\theta)\tau_0^2; \quad \psi = \frac{2(1-\theta)^3}{3\theta}; \quad \phi = (1-\theta)^2; \quad (1)$$

$$p = \frac{1}{3} \sum_{i=1}^3 \sigma_{ii}; \quad \tau^2 = \sum_{i,j=1}^3 (\sigma_{ij} - p\delta_{ij})^2;$$

где p, τ – первый и второй инварианты тензора напряжений соответственно, δ_{ij} – символ Кронекера или единичный тензор, θ – пористость, то есть объёмная доля пустот в материале, τ_0 – предел текучести «твёрдой фазы», то есть материала каркаса пористого тела. Деформационное упрочнение описывается уравнением:

$$\tau_0 = a + b\omega^\alpha; \quad \frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{\sqrt{1-\theta}} \sqrt{\psi e^2 + \phi \gamma^2}; \quad (2)$$

$$e = \sum_{i=1}^3 e_{ii}; \quad \gamma^2 = \sum_{i,j=1}^3 \left(e_{ij} - \frac{1}{3} e \delta_{ij} \right)^2;$$

где a, b, α – начальный предел текучести, коэффициент упрочнения и показатель упрочнения, соответственно, для материала порошка, e, γ – первый и второй инварианты тензора скоростей деформаций соответственно, ω – накопленная деформация «твёрдой фазы».

Поверхности нагружения (1) будет соответствовать удельная диссипация:

$$D(e_{ij}) = \tau_0 \sqrt{1-\theta} \sqrt{\psi e^2 + \varphi \gamma^2}, \quad (3)$$

которая является также диссипативным потенциалом, то есть:

$$\sigma_{ij} = \frac{\partial D}{\partial e_{ij}}. \quad (4)$$

Из (3) и (4) с учетом равенств $\frac{\partial e}{\partial e_{ij}} = \delta_{ij}$ и $\frac{\partial \gamma}{\partial e_{ij}} = \frac{e_{ij} - \frac{1}{3} e \delta_{ij}}{\gamma}$ получим выражения для напряжений через скорости деформаций:

$$\sigma_{ij} = \frac{\tau_0 \sqrt{1-\theta}}{\sqrt{\psi e^2 + \varphi \gamma^2}} \left[\left(\psi - \frac{\varphi}{3} \right) e \delta_{ij} + \varphi e_{ij} \right]. \quad (5)$$

В случае ненулевых скоростей деформаций только e_{rr} и $e_{r\phi}$ инварианты e, γ примут вид $e = 2e_{rr}$, $\gamma^2 = \frac{2}{3}e_{rr}^2 + 2e_{r\phi}^2$ и рабочее давление прессования $P = -\sigma_{rr}$, исходя из (5), запишется в виде

$$P = -\sigma_{rr} = -\frac{\tau_0 \sqrt{1-\theta} \left(2\psi + \frac{\varphi}{3} \right) e_{rr}}{\sqrt{2} \sqrt{\left(2\psi + \frac{\varphi}{3} \right) e_{rr}^2 + \varphi e_{r\phi}^2}}. \quad (6)$$

Выразив ψ и φ через пористость θ согласно (1) и с учетом $e_{rr} < 0$ получим

$$P = -\sigma_{rr} = \tau_0 \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{(1-\theta)^{\frac{3}{2}}}{\sqrt{\theta}} \frac{\sqrt{4-3\theta}}{\sqrt{1 + \frac{3\theta}{4-3\theta} K^2}}; \quad K = \left| \frac{e_{r\phi}}{e_{rr}} \right|. \quad (7)$$

Параметр K является мерой дополнительных сдвиговых деформаций, возникающих в результате вращения друг относительно друга внутренней и внешней стенок пресс-формы. Кинематика рассматриваемой в этой работе схемы холодного осевого прессования трубчатых заготовок совмещенного с вращением внутренней и внешней стенок пресс-формы с разной угловой скоростью характеризуется одним лишь этим параметром K , в силу нечувствительности усилий припластической деформации к абсолютной величине скорости.

Поскольку в нашем случае пористость монотонно убывает по времени, то в качестве параметра, характеризующего ход процесса уплотнения, можно вместо времени взять пористость. Время и пористость связаны между собой уравнением неразрывности (сохранения массы):

$$\frac{d\theta}{dt} = (1-\theta)e. \quad (8)$$

Тогда для накопленной деформации «твердой фазы» с учетом (2) и (8), а также выразив ψ и φ через пористость θ согласно (1), получим дифференциальное уравнение:

$$\frac{d\omega}{d\theta} = -\frac{\sqrt{\frac{4-3\theta}{3\theta} + K^2}}{\sqrt{2(1-\theta)}}. \quad (9)$$

Общим решением этого уравнения является неопределенный интеграл, который может быть выражен через специальные функции – «эллиптические интегралы».

$$E\{M, N\} = \int_0^M \sqrt{1 - N^2 \sin^2 Y} dY \quad (10)$$

Выпишем общее решение уравнения (9):

$$F(\theta, K) = -\frac{1}{\sqrt{6}} \int \frac{\sqrt{4 + 3\theta(K^2 - 1)}}{\sqrt{\theta}\sqrt{1 - \theta}} d\theta = \begin{cases} F_1(\theta, K); & K > 1 \\ -2\sqrt{\frac{2}{3}} \arcsin \sqrt{\theta}; & K = 1 \\ F_2(\theta, K); & 0 \leq K < 1 \end{cases} \quad (11)$$

$$F_1(\theta, K) = \sqrt{2(K^2 - 1)} \left[\sqrt{(1 - \theta)g_1(\theta)} - \frac{1}{a} E\{\arcsin(g_1(\theta)/a), a\} \right] \quad (12)$$

$$g_1(\theta) = \sqrt{\frac{3(K^2 - 1)\theta}{4 + 3\theta(K^2 - 1)}}; \quad a = g_1(1) = \sqrt{\frac{3(K^2 - 1)}{3K^2 + 1}}$$

$$F_2(\theta, K) = \sqrt{2(1 - K^2)} \left[\frac{1}{b} E\{\arcsin(g_2(\theta)/b), b\} - \sqrt{\theta}g_2(\theta) \right] - \sqrt{\frac{2}{3}}\pi \quad (13)$$

$$g_2(\theta) = \sqrt{\frac{3(1 - K^2)(1 - \theta)}{4 - 3\theta(1 - K^2)}}; \quad b = g_2(0) = \frac{\sqrt{3(1 - K^2)}}{2}$$

Тогда решением уравнения (9) с начальным условием $\omega(\theta_0) = 0$, где θ_0 – начальная пористость, будет $\omega(\theta, \theta, K) = F(\theta, K) - F(\theta_0, K)$.

Влияние параметров материала и схемы прессования на рабочее давление.

Полученное таким образом аналитическое выражение для накопленной деформации после подстановки в (2) и (7) позволяет найти рабочее давление прессования тоже в замкнутом аналитическом виде $\sigma_{zz} = \sigma_{zz}(\theta_0, \theta, K, a, b, \alpha)$, где θ_0 и θ – начальная и текущая пористость соответственно. На рис. 2 сравниваются кривые давление-плотность при наличии и отсутствии взаимного вращения боковых стенок для материала с параметрами упрочнения $b = 5a$, $\alpha = 0.9$. Видно, что, начиная с определенного момента, взаимное вращение боковых стенок вызывает увеличение рабочего давления.

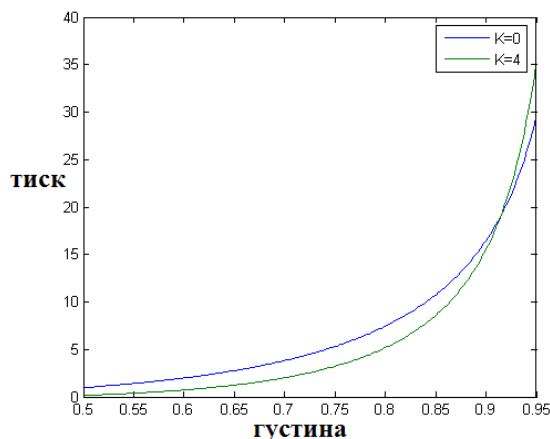


Рис. 2. Зависимость рабочего давления (нормированного пределом текучести «твердой фазы») от плотности

Выражение $\sigma_{zz} = \sigma_{zz}(\theta_0, \theta, K, a, b, \alpha)$ было использовано для анализа целесообразности вращения пуансонов с точки зрения уменьшения рабочего давления. Пусть имеем порошковую заготовку из некоторого материала с начальной пористостью θ_0 , тогда σ_{zz} зависит только от двух параметров θ и K . Поэтому имеет смысл отыскать такие значения (θ, K) , при которых наблюдается уменьшение давления прессования по сравнению со схемой без сдвиговых деформаций. Для случая материала с параметрами упрочнения $b = 5a$, $\alpha = 0.9$ и начальной пористостью 0.5 область таких значений (θ, K) , то есть область целесообразности предложенной схемы, показана на рис. 3 (эта область зарисована серым цветом).

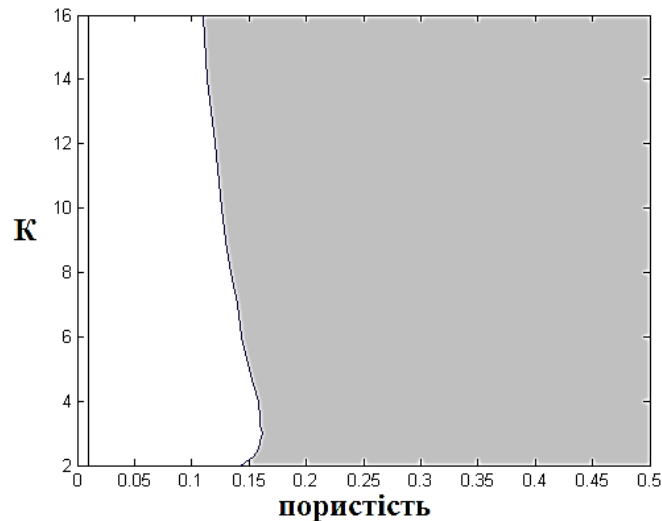


Рис. 3. Область целесообразности параметров θ, K

Следует отметить, что как видно из (7) при значительных степенях уплотнения ($\theta \rightarrow 0$) воздействие K на рабочее давление значительно ослабляется, потому как видно из рис.3 для каждой величины K существует такое предельное значение пористости, что для дальнейшего уплотнения сдвигать боковые стенки одну относительно другой в дальнейшем нецелесообразно. Однако такие предельные значения пористости, которые назовем в дальнейшем кривой целесообразности, существенно зависят не только от K , но и от начальной плотности заготовки. Это хорошо видно из рис. 4. где приведены кривые целесообразности для различных значений начальной пористости для того же материала $b = 5a$, $\alpha = 0.9$.

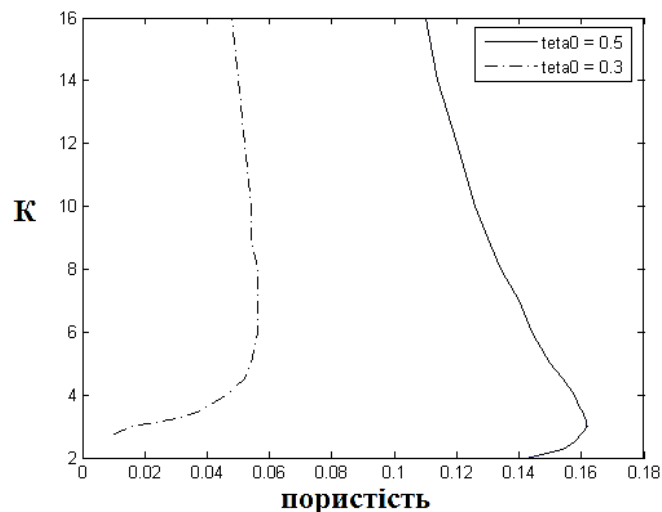


Рис. 4. Кривые целесообразности для различной начальной пористости θ_0

Кривые целесообразности, естественно, очень существенно зависят от деформационного упрочнения материала (рис 5), причем как от коэффициента b , так и показателя упрочнения α .

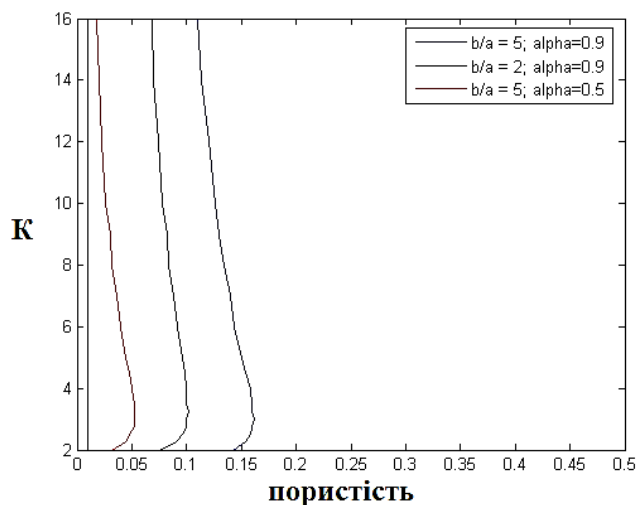


Рис. 5. Кривые целесообразности для различных случаев деформационного упрочнения с начальной пористости $\theta_0 = 0.5$

ВЫВОДЫ

На основе результатов, изложенных выше, установлено как влияет вращение матрицы относительно пуансона на зависимость между плотностью и давлением при холодном прессовании порошков в жесткой матрице. Важно, что решение данной задачи было получено в аналитической форме. Это решение позволяет иметь качественное представление как о процессах прессования порошков, совмещенных со сдвиговыми деформациями, так и о более сложных схемах с неоднородным напряженно-деформированным состоянием.

На начальной стадии прессования использование вращающихся матриц или пуансонов способствует снижению давления прессования. С возрастанием степени уплотнения, т. е. на поздних стадиях прессования наличие вращения приводит к возрастанию давления прессования. Момент перехода от стадии уменьшения давления к стадии его увеличения существенно зависит от того, насколько упрочняемым является материал порошка. Проведенный анализ свидетельствует о том, что с точки зрения указанных результатов, вращение матрицы целесообразно использовать для порошков, материал которых ближе к идеально-пластическому.

Анализ зависимости между плотностью и давлением, приведенной на рис. 2 и рис. 3, свидетельствует о том, что вращение матрицы на протяжении всего процесса прессования целесообразно использовать лишь в том случае, когда нужно получить не полностью допрессованную заготовку, в которой пористость должна быть более, чем порядка 0,15, и определяется начальной пористостью.

В то же время, если предположить ограниченную в силу технологических причин относительную величину сдвиговых деформаций K , то анализ рис. 3 и рис. 4 свидетельствует о том, что зачастую целесообразнее вращать стенки матрицы только в конце процесса прессования. То есть в случаях значительного уплотнения от больших до малых пористостей вращать друг относительно друга стенки матрицы с самого начала прессования нецелесообразно.

Вопрос же о том, как оптимально синхронизировать вращение стенок и степень уплотнения заготовки, требует дополнительного исследования, выходящего за рамки этой работы. Эта задача является интересной темой для дальнейших исследований в затронутом направлении.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1. Штерн М. Б. Развитие теории прессования и пластического деформирования порошковых материалов. *Порошковая металлургия*. 1992. 9. С. 12–24.
2. Михайлов О. В., Штерн М. Б. Вплив крутіння пористих заготовок на їх ущільнення в закритому штампі. *Математичні моделі і обчислювальний експеримент в матеріалознавстві*. Київ: ІПМ ім. І. М. Францевича НАН України. 2013. 15. С. 81–85.
3. Бейгельзимер Я. Е., Варюхин В. Н., Орлов Д. В., Сынков С. Г. Винтовая экструзия – процесс накопления деформации. Донецк : ТЕАН, 2003. 85 с.
4. Валиев Р. З., Александров И. В. Наноструктурные материалы, полученные интенсивной пластической деформацией. Москва : Логос, 2000. 271 с.
5. Сегал В. М., Резников В. И., Копылов В. И., Павлик Д. А., Малышев В. Ф. Процессы пластического структурообразования металлов. Минск : Наука и техника, 1994. 232 с.
6. Бриджмен П. В. Исследование больших пластических деформаций и разрыва. Москва : Изд-во иностранной литературы, 1955. 444 с.
7. Varyukhin V.N., Beygelsimer Y.Y., Synkov S.G. etc. Consolidation of amorphous Al86Ni6Go2Gd6 melt spun ribbons by twist extrusion. *Material Science Forum*. 2006. 503–504, pp. 699–704.
8. Xiang S., Matsuki K., Tahatsuju N., Tokizawa M., Yokote T., Kusui J., Yokoi K. Microstructure and mechanical properties of PM 2024Al – 3Fe – 5Ni alloy consolidated by a new process, equal channel angular pressing. *Journal of Materials Science Letters*. 1997. 16, pp. 1725–1727.
9. Xia K., Wu X. Back pressure equal channel angular consolidation of pure Al particles. *Scripta Materialia*. 2005. 53, pp. 1225–1229.
10. Штерн М. Б., Сердюк Г. Г. и др. Феноменологические теории прессования порошков. Київ : Наукова думка, 1982. 140 с.

REFERENCES

1. Stern M. B. Development of the theory of pressing and plastic deformation of powder materials. *Powder Metallurgy*. 1992, 9, pp. 12 – 24. (in Russian).
2. Mikhailov O.V., Stern M.B. Intrusion of porous workpieces at the openings in closed stamp. *Mathematical models and descriptive experiment in materials*. Kyiv: IPM named I.M.Frantsevich of NAS Ukraine. 2013, 15, pp. 81–85. (in Ukrainian).
3. Beigelzimer Y.E., Varyukhin V.N., Orlov D.V., Synkov S.G. Screw extrusion is the process of strain accumulation. Donetsk: TEAN. 2003, 85 p. (in Russian).
4. Valiev R.Z., Aleksandrov I.V. Nanostructured materials obtained by intensiv plastic deformation. Moscow: Logos. 2000, 271 p. (in Russian).
5. Segal V.M., Reznikov V.I., Kopylov V.I., Pavlik D.A., Malyshev V. F. Processes of plastic structure formation of metals. Minsk: Science and technology. 1994, 232 p. (in Russian).
6. Bridgman P.V. Research of large plastic deformations and rupture. Moscow: Publishing house of foreign literature. 1955, 444 p. (in Russian).
7. Varyukhin V.N., Beygelsimer Y.Y., Synkov S.G. et al. Consolidation of amorphous Al86Ni6Go2Gd6 melt spun ribbons by twist extrusion. *Material Science Forum*. 2006, 503–504, pp. 699–704.
8. Xiang S., Matsuki K., Tahatsuju N., Tokizawa M., Yokote T., Kusui J., Yokoi K. Microstructure and mechanical properties of PM 2024Al – 3Fe – 5Ni alloy consolidated by a new process, equal channel angular pressing. *Journal of Materials Science Letters*. 1997, 16, pp. 1725–1727.
9. Xia K., Wu X. Back pressure equal channel angular consolidation of pure Al particles. *Scripta Materialia*. 2005, 53, pp. 1225–1229.
10. Stern M.B., Serdyuk G.G. et al. Phenomenological theories of powder pressing. Kiev: Naukova Dumka. 1982, 140 p. (in Russian).

Штерн М. Б. – чл-корр. НАН України, зав. віділом, проф. ІПМ ім. І. Н. Францевича НАНУ; НТУУ «КПІ ім. І. Сикорського»;

Кузьмов А. В. – канд. техн. наук, ст. науч. сотр. ІПМ ім. І. Н. Францевича НАНУ; НТУУ «КПІ ім. І. Сикорського»;
E-mail: kavipms@bigmir.net.

ІПМ ім. І. Н. Францевича НАНУ – Інститут проблем матеріалознавства імені І. Н. Францевича Національної академії наук України, г. Київ.

НТУУ «КПІ ім. І. Сикорського» – Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут імені І. Сикорського», г. Київ.