

УДК 620.178.6

DOI: 10.21209/2658-7114-2019-15-3-75-84

*Сергей Яковлевич Березин,
доктор технических наук, профессор,
Забайкальский государственный университет
(673039, Россия, г. Чита, ул. Александрo-Заводская, 30),
e-mail: Berlog_berezin2011@mail.ru*

Параметры процесса пластической деформации при внутреннем резьбовыдавлении

В статье представлен анализ условий формирования внутренних резьбовых профилей при работе начального деформирующего витка резьбовыдавливающей крепежной детали. Для описания условий представлены геометрические элементы рабочих участков деформирующего витка и графические схемы процесса его внедрения. Разработаны математические зависимости для установления основных параметров процесса деформации, таких как степень, скорость, объём деформации и др. Они необходимы для производства расчетов силовых показателей процесса резьбообразования как в обычных условиях, так и при использовании интенсифицирующих воздействий. Предлагаемая расчётная методика может быть легко адаптирована для анализа подобных процессов, в частности, при работе раскатников.

Ключевые слова: резьбовыдавливание, внутренняя резьба, стенка отверстия, пластическая деформация, резьбоформирующий крепёж, раскатник, абсолютная деформация

Получение внутренних резьб раскатниками и резьбоформирующим крепежом связано с пластической деформацией, в результате которой определённый объём металла выдавливается вершиной инструмента и перетекает в его резьбовую впадину, формируя внутренний профиль. Такой процесс протекает в стеснённых условиях, сопровождающихся высокими значениями усилий и моментов деформации. Последние, в свою очередь, зависят от скорости работы инструмента, геометрии его рабочих участков, механических свойств обрабатываемого материала и технологических факторов. Силовые и скоростные показатели процесса резьбовыдавливания достаточно подробно изучены ранее [2; 5; 6]. Параметры же самого деформационного процесса освещены не в полной мере. Например, в работе предлагается методика расчёта степени деформации «Получение резьб выдавливающими метчиками» [5]. Имеются некоторые сведения по глубине упрочняемого слоя, влиянию скорости завинчивания, на силовые показатели процесса и другие данные [3]. Однако такая разрозненная информация не формирует общей картины процесса, и не позволяет оценить такую совокупность параметров, как абсолютная и относительная деформации, скорость

деформации, деформируемый объём, площадь внедрения рабочей грани инструмента и пространство её перемещения, степень деформации при резьбовыдавливании. Необходимо отметить, что скорость завинчивания и скорость деформации есть величины связанные, но разные.

Определение перечисленных параметров можно рассмотреть на примере процесса работы деформирующего витка резьбовыдавливательной крепёжной детали (винта, шпильки, болта). Геометрия деформирующей части этого витка представляет часть резьбового витка, пересечённого плоскостью торцевой фаски. Её вид представлен на рис. 1.

Для удобства представим деформирующую плоскость заходного витка в прямоугольной системе координат XYZ в развёрнутом виде в форме треугольника $F_0K_0C_0$. Для того чтобы установить координаты точек F_0 , K_0 , C_0 в безразмерном виде, возьмём координату $Z_c = C_M$, равную 1. При перемещении плоскости $F_0K_0C_0$ на величину ΔL вдоль отрезка K_0K_1 параллельно самой себе величиной абсолютной деформации будет расстояние между старым ($F_0K_0C_0$) и новым положением ($F_1K_1C_1$) плоскости FKC , взятое по нормали к ней. В реальной форме (в круговой системе координат) ребро F_0C_0 представляет собой Архимедову спираль с углом подъёма γ .

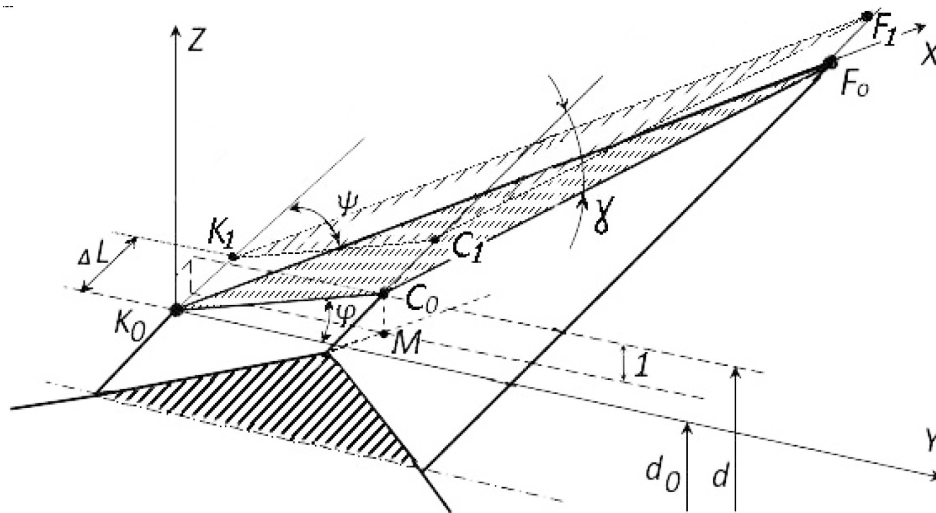


Рис. 1. Положение деформирующей плоскости в системе $OXYZ$ при определении величины абсолютной деформации: γ – угол подъёма спирали Архимеда F_0C_0 ; φ – угол торцевой фаски; ψ – угол подъёма винтовой линии; ΔL – элементарное перемещение

Fig. 1. The position of the deforming plane in the system $OXYZ$ at determining the magnitude of the absolute deformation: γ – angle of elevation of the spiral of Archimedes F_0C_0 ; φ – facet angle; ψ – helix elevation angle; ΔL – elementary movement

Прежде чем перейти к определению величины абсолютной деформации, рассмотрим процесс внедрения деформирующей плоскости FKC в материал стенки отверстия, представленный на рис. 2.

Процесс внедрения деформирующей плоскости FKC начинается в точке θ , в которой точка F_0 этой плоскости касается стенки отверстия. При дальнейшем вращении крепёжной детали вокруг оси плоскость FKC за счёт угла подъёма γ (рис. 1)

L . При этом в данной работе конечное положение плоскости $F_1K_1C_1$ рассматривается как для элементарного смещения ΔL , так и для полного L . При этом, величина относительной деформации будет соответствовать отношению $\Delta\delta/\delta$. Вертикальное (радиальное) перемещение точки C при полной деформации будет равно $0,5(d - d_0)$, а соответствующее ему перемещение деформирующей плоскости FKC на расстояние L будет равно

$$L = \frac{d - d_0}{2 \tan \gamma} \cdot \beta, \quad (1)$$

где γ – угол подъёма деформирующего ребра FC в направлении винтовой линии;
 β – угол отклонения ребра FC относительно поперечной плоскости [2].

В системе $OXYZ$ (рис. 1) координатами опорных точек плоскости будут следующие

$$F_0(X_F; 0; 0); C_0(X_C; Y_C; 1); K_0(0; 0; 0),$$

где $X_F; X_C; Y_C$ – координаты исходных точек F_0 и C_0 .

Таким образом, для установления величины *абсолютной деформации*, необходимо определить координаты X_F, X_C, Y_C . Согласно работе С. Я. Березина [2, рис. 2.3.], справедливо следующее соотношение:

$$\frac{FK}{AB} = \frac{h}{H},$$

где AB – проекция стороны FK на линию внутреннего диаметра резьбы;

H – высота исходного профиля по ГОСТ 9150-81;

h – глубина внедрения витка, в соответствии с данными автора [2], $h = CM = 1$.

В свою очередь $H = 0,866P$ (P – шаг резьбы).

Тогда координаты точек F и C будут равны

$$X_F = FK = \frac{AB}{H} = \frac{\pi d_1}{0,866P} \approx \frac{P}{0,866P \cdot \tan \psi} \approx \frac{1,1547}{\tan \psi}.$$

Проекция стороны FC на плоскость XOY равна

$$FM = \frac{1}{(\tan \varphi) \cdot \sin \beta},$$

где β – угол наклона проекции стороны FC на плоскость XOY к линии поперечного сечения.

Проекция FM на ось X будет равна

$$X_{FM} = FM \cdot \cos \beta = \frac{\cot \beta}{\tan \varphi}.$$

Тогда, согласно рис. 1, координата X_C определится в виде

$$X_C = FR - X_{FM} = \frac{1,1547}{\tan \psi} - \frac{\cot \beta}{\tan \varphi}.$$

Координата Y равна проекции на ось OY

$$Y_C = \frac{1}{\tan \varphi}.$$

Сведем найденные координаты в единую систему

$$F \left[\frac{1,1547}{\tan \varphi}; 0; 0 \right], K(0; 0; 0); \left[\left(\frac{1,1547}{\tan \varphi} - \frac{\cot \beta}{\tan \varphi} \right); \frac{1}{\tan \varphi}; 1 \right].$$

Данные координаты позволяют получить уравнение плоскости

$$\begin{vmatrix} X - X_0 & Y - Y_0 & Z - Z_0 \\ X_1 - X_0 & Y_1 - Y_0 & Z_1 - Z_0 \\ X_2 - X_0 & Y_2 - Y_0 & Z_2 - Z_0 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} X & Y & Z \\ \left[\frac{1,1547}{\tan \psi} \right] & 0 & 0 \\ \left[\frac{1,1547}{\tan \psi} - \frac{\cot \beta}{\tan \varphi} \right] & \left[\frac{1}{\tan \varphi} \right] & 1 \end{vmatrix}. \quad (2)$$

Развернув определитель (2), получим уравнение следующего вида:

$$\begin{vmatrix} 0 & 0 \\ \frac{1}{\tan \varphi} & 1 \end{vmatrix} - Y \begin{vmatrix} \frac{1,1547}{\tan \psi} & 0 \\ \frac{1,1547}{\tan \psi} - \frac{\cot \beta}{\tan \varphi} & 1 \end{vmatrix} + Z \begin{vmatrix} \frac{1,1547}{\tan \psi} & 0 \\ \frac{1,1547}{\tan \psi} - \frac{\cot \beta}{\tan \varphi} & \frac{1}{\tan \varphi} \end{vmatrix} = \\ = -Y \frac{1,1547}{\tan \psi} + Z \frac{1,1547}{\tan \psi \cdot \tan \varphi}. \quad (3)$$

Уравнение (3) является уравнением плоскости FKC в координатах XYZ в форме $AX + BY + CZ + D = 0$. Из него можно установить значения коэффициентов A, B, C, D

$$A = 0; b = -\frac{1,1547}{\tan \psi}; C = \frac{1,1547}{\tan \psi \cdot \tan \varphi}; D = 0.$$

На рис. 3 представлен объём перемещений, произведённых плоскостью FKC при ее сдвиге под углом ψ относительно оси на величину ΔL (L).

Если внедрение деформирующей плоскости FKC в материал стенки отверстия начинается в точке F_0 , то, согласно рис. 2, оно заканчивается в точке C_1 , переместившись в новое положение $F_1K_1C_1$. Тогда объём между начальным и новым положением плоскости будет представлять наклонную 3-гранную призму ($F_0K_0C_0F_1K_1C_1$), объём который можно назвать сдвиговым объёмом. Он лишь частично связан с объёмом деформации. Для определения последнего необходимо спроецировать новое положение плоскости $F_1K_1C_1$ на ось OZ . Тогда устанавливается нормаль δ между начальным и конечным положением плоскости, которая по сути является абсолютной деформацией, соответствующей полному смещению L . Величина *деформируемого объёма* V будет равна объёму 3-гранной пирамиды $F_0F_1K_1C_1$ (рис. 3)

$$V = \frac{1}{3} \cdot \delta \cdot S_{F_1K_1C_1}, \quad (4)$$

где $S_{F_1K_1C_1}$ – площадь деформирующей плоскости.

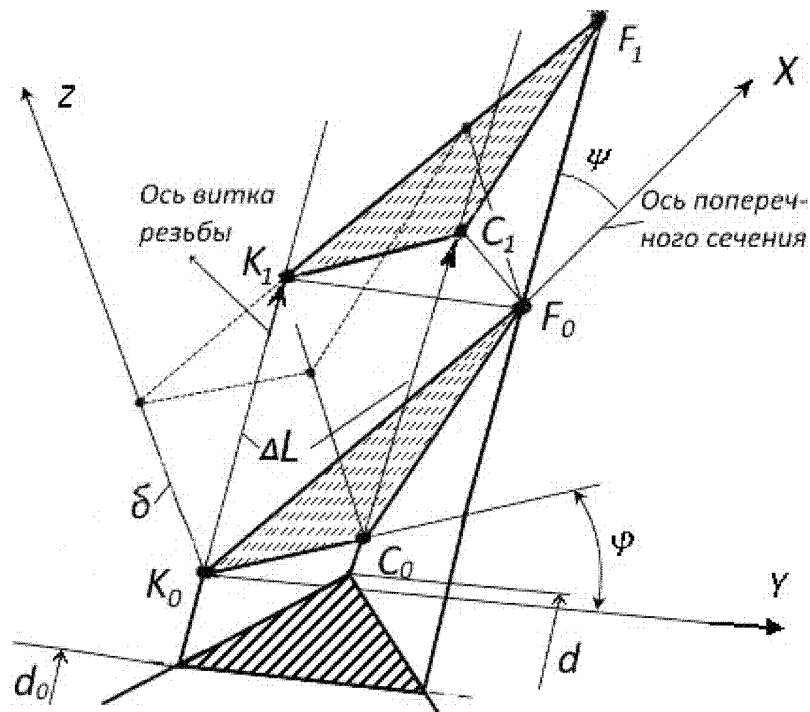


Рис. 3. Построение объёма перемещений в координатах $OXYZ$, образуемого при смещении плоскости FRC на величину ΔL : δ – абсолютная деформация; $F_0K_1C_1F_1$ – объём деформации

Fig. 3. Construction of the volume of displacements in the coordinates $OXYZ$, formed when the plane FRC is shifted by ΔL : δ – absolute deformation; $F_0K_1C_1F_1$ – deformation volume

Величину абсолютной деформации можно установить из уравнения (3) в форме

$$\delta = \frac{AX_{K_1} + BY_{K_1} + CZ_{K_1} + D}{\sqrt{A^2 + B^2 + C^2}}. \quad (5)$$

После подстановки координат точек и преобразований, с учётом нового положения точки K

$$\begin{cases} X_{K_1} = \Delta L \cdot \cos \psi; \\ Y_{K_1} = -\Delta L \cdot \sin \psi; \\ Z_{K_1} = 0. \end{cases}$$

Получим

$$\delta = \left(\sin \psi \cdot \frac{1,1547}{\tan \psi} \right) \cdot \frac{L}{\sqrt{\frac{1}{(\tan \psi)^2 + (\tan \psi)^2 \cdot (\tan \varphi)^2}}} = L \cdot \sin \psi \sin \varphi. \quad (6)$$

Скорость деформации зависит от скорости вращения крепежной детали V_τ и геометрии деформирующей плоскости. Вектор скорости деформации совпадает с вектором δ и по величине равен

$$\nu_L = 0,5 \cdot \nu_\tau \sin 2\psi \cdot \varphi.$$

При этом работа деформации, совершённая гранью FKC , будет определяться интенсивностью контактных напряжений, объёмом и величиной относительной деформации на длине перемещения L

$$A = \sigma_K V \int_{d_0}^d \frac{dZ}{Z} = \sigma + KV \ln \frac{d}{d_0}, \quad (7)$$

где Z – вертикальная координата по высоте витка;

σ_K – контактное напряжение при пластической деформации [1];

V – объём деформации в соответствии с формулой (4).

Выражение $\ln \frac{d}{d_0}$ представляет среднюю величину относительной деформации при вдавливании плоскости FKC при её перемещении в направлении ввинчивания на величину L .

Много вопросов возникает при установлении значений степени деформации при выдавливании внутренних резьб. Анализируя работы, посвящённые данному вопросу [4–6], можно выделить две формы оценки степени деформации – геометрическую и фактическую. Вообще в целом, степень деформации – это отношение объёма деформированного (перемещённого) материала к объёму деформирующей части инструмента. В соответствии с формулами (1), (4), (6) геометрическую степень деформации можно представить выражением вида

$$W = \frac{V}{V_1} = \frac{d - d_0}{d - d_1} \cdot \frac{S_{F_1K_1C_1}}{S_{F_1B_1C_1}}, \quad (8)$$

где V_1 – объём деформирующей части витка между наружным и внутренним диаметрами;

$S_{F_1K_1C_1}$ – площадь деформирующей плоскости в соответствии с рис. 3;

$S_{F_1B_1C_1}$ – общая площадь основания витка по линии внутреннего диаметра [2, рис. 2.3, линия АВ].

Для оценки фактической степени деформации необходимо учесть и то, что материал под воздействием деформирующих элементов не только перемещается (течёт), заполняя впадину винта, но и упрочняется. В контактных областях, где проявляется деформирующее воздействие, он уплотняется, зёрна металла вытягиваются, т. е. мы

имеем такую же деформированную область. Она представлена на рис. 4 и отмечена пунктирной кривой. Глубину упрочнённой зоны можно определить на основе измерений микротвёрдости специально подготовленных образцов. Такие данные приведены в работе С. Я. Березина [3], на основе которых установлено, что наибольшее упрочнение получают слои, прилегающие к вершинам резьбы и правой боковой стороны, где в наибольшей степени проявляется деформирующее действие плоскости ФКС. Глубина упрочнённой области распределена неравномерно, поэтому её сложно учесть при определении фактической степени деформации.

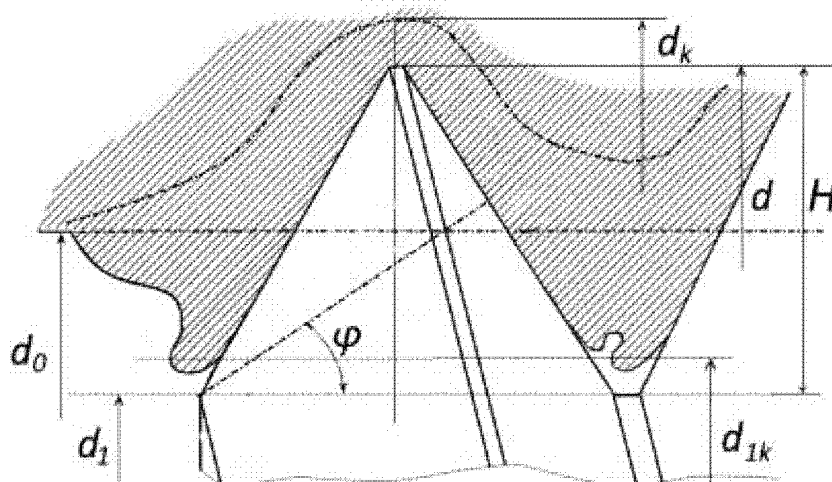


Рис. 4. Сформированный резьбовой профиль с учётом области упрочнённого материала: H – высота профиля винта; d_0 – диаметр отверстия под резьбу; d_{1K} – внутренний диаметр сформированной резьбы; d_K – диаметр вершин упрочнённой зоны в корпусе; φ – угол наклона деформирующей плоскости (фаски)

Fig. 4. Formed threaded profile taking into account areas of hardened material: H – screw profile height; d_0 – diameter of the hole for the thread; d_{1K} – inner diameter of the formed thread; d_K is the diameter of the vertices of the hardened zone in the housing; φ – angle of inclination of the deforming plane (chamfer)

Если в формуле (8) оставить неизменным объём V_1 , то в числителе необходимо учесть глубину этой упрочнённой области в виде среднего от суммы высот двух областей – ниже d и ниже d_K . Тогда получим выражение для фактической степени деформации

$$W = \frac{V_K}{V_1} = \frac{d + d_K - 2d_0}{2(d - d_1)} \cdot \frac{S_{F_1K_1C_1}}{S_{F_1B_1C_1}}, \quad (9)$$

где V_K – усреднённый объём деформированной области с учётом размеров упрочнённого слоя.

Численные испытания формул (8) и (9) показали следующее:

1. Фактическая степень деформации для средних размеров крепёжных резьб (М10 – М14) на 4–6 % выше, чем геометрическая степень.

2. Средний уровень фактических степеней деформации для крепёжных метрических резьб зависит в основном от величины припуска под резьбу, т. е. от диаметра подготовленного отверстия, и колеблется в пределах (38–43 %).

В результате анализа процесса пластической деформации при внутреннем резьбовом выдавливании установлены основные его параметры, включая величины абсолютной и относительной деформаций, скорости деформирования, деформированного объёма, площади и степени деформации. Они позволяют более детально представлять процесс образования внутренней резьбы и использовать полученные данные для описания и моделирования родственных процессов.

Список литературы

1. Березин С. Я. Исследования пластических свойств цветных сплавов применительно к процессам резьбового выдавливания // Механическое оборудование металлургических заводов. 2019. № 1. С. 33–40.
2. Березин С. Я., Чумаков Р. Е., Леонов В. Н. Научные основы технологии сборочно-резьбообразующих процессов: монография. Чита: ЗабГПУ, 2005. 213 с.
3. Березин С. Я., Романова Л. С. Асимметрия выдавливаемых профилей при образовании гладко-резьбовых соединений // Учёные записки Забайкальского государственного университета. 2013. № 3. С. 7–13.
4. Накатывание резьб, червяков, шлицев, зубьев / В. В. Лапин, М. И. Писаревский, В. В. Самсонов [и др.]. Л.: Манинстроение: Ленингр. отд-ние, 1986. 228 с.
5. Получение резьб выдавливающими метчиками / сост. С. И. Велицкий, С. И. Курман // Обзоры по межотраслевой тематике ГосИНТИ № 2/41-70. М.: ГосИНТИ, 1970. 37 с.
6. Рыжов Э. В., Андрейчиков О. С., Шешков А. Е. Раскатывание резьб. М.: Машиностроение, 1974. 122 с.

Статья поступила в редакцию 3.04.2020; принята к публикации 30.04.2020

Библиографическое описание статьи

Березин С. Я. Параметры процесса пластической деформации при внутреннем резьбовом выдавливании // Учёные записки Забайкальского государственного университета. 2020. Т. 15, № 3. С. 75–84. DOI: 10.21209/2658-7114-2020-15-3-75-84.

Sergey Ya. Berezin,
Doctor of Engineering Sciences, Professor,
Transbaikal State University
(30 Aleksandro-Zavodskaya st., Chita, 672039, Russia),
e-mail: Berlog_berezin2011@mail.ru

Parameters of Plastic Deformation Process During Internal Thread Tapping

The article presents an analysis of the conditions for the formation of internal threaded profiles during the operation of the initial deforming scroll of the threaded fastener. To describe the conditions, geometric elements of the working sections of the de-forming coil and graphical diagrams of the process of its implementation are presented. Mathematical dependencies have been developed to determine the main parameters of the deformation process, such as the degree, speed, volume of deformation, etc. They are necessary for calculating the power parameters of the thread forming process both under normal conditions and when using intensifying influences. The proposed calculation method can be easily adapted for the analysis of such processes, in particular in the operation of deforming a taps.

Keywords: thread tapping, internal thread, hole wall, plastic deformation, thread forming fasteners, deforming a tap, absolute deformation

Translit

1. Berezin, S. Ya. Issledovaniya plasticheskikh svojstv cvetnykh splavov primenitel'no k processam rez'bovydavlivaniya // Mekhanicheskoe oborudovanie metallurgicheskikh zavodov. 2019. № 1. S. 33–40.
2. Berezin, S. Ya., Chumakov, R. E., Leonov, V. N. Nauchnye osnovy tekhnologii sborochno-rez'boobrazuyushchih processov: monografiya. Chita: ZabGPU, 2005. 213 s.
3. Berezin, S. Ya., Romanova, L. S. Asimmetriya vydavlivayemykh profilej pri obrazovanii gladko-rez'bovykh soedinenij // Uchyonye zapiski Zabajkalskogo gosudarstvennogo universiteta. 2013. № 3. S. 7–13.
4. Nakatyvanie rez'b, chervyakov, shlicev, zub'ev / V. V. Lapin, M. I. Pisarevskij, V. V. Samsonov [i dr.]. L.: Mashinostroenie: Leningr. otd-nie. 1986. 228 s.
5. Poluchenie rez'b vydavlivayushchimi metchikami / sost. S. I. Velickij, S. I. Kuzurman // Obzory po mezhotraslevoj tematike GosINTI № 2/41-70. M.: GosINTI, 1970. 37 s.
6. Ryzhov, E. V., Andrejchikov, O. S., Steshkov, A. E. Raskatyvanie rez'b. M.: Mashinostroenie, 1974. 122 s.

Received: April 03, 2020; accepted for publication April 30, 2020

Reference to article

Berezin S. Ya. Parameters of Plastic Deformation Process During Internal Thread Tapping // Scholarly Notes of Transbaikal State University. 2020. Vol. 15, No 3. PP. 75–84. DOI: 10.21209/2658-7114-2020-15-3-75-84.